



## **Fundição de Torneiras por Baixa Pressão**

*Daniel da Silva Ferreira*

### **Dissertação do MIEM**

Orientador no INEGI: Engenheiro Rui Jorge de Lemos Neto

Orientador na FEUP: Professora Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

Julho de 2015



*Aos meus pais, irmã e namorada*



## RESUMO

---

Esta dissertação aborda o tema da fundição de torneiras pelo processo de baixa pressão e tem como objetivos estudar o processo, as ligas usadas e os defeitos comuns deste tipo de fundição em coquilha. Foi também realizada uma análise de defeitos numa peça e apresentadas propostas com o intuito de eliminar esses defeitos.

Para melhor entender o processo de fundição em coquilha por baixa pressão de ligas de cobre e tudo o que lhe diz respeito foi realizada uma revisão bibliográfica que incide no processo em si, nas ligas usadas, nomeadamente os latões com e sem chumbo, os defeitos associados ao processo e as suas causas.

Após a realização do estudo teórico iniciou-se a parte experimental onde primeiramente foram analisados os defeitos presentes numa peça em latão vazada pelo processo de fundição por baixa pressão contendo rechupes de solidificação. Posteriormente, através de simulações numéricas do processo de solidificação e dos conhecimentos obtidos na revisão bibliográfica, foi feito um estudo com o objetivo de encontrar soluções para poder produzir a peça sem defeitos. Este estudo consistiu num processo iterativo onde foram realizadas simulações para prever se a solução adotada resolveria o problema.

Da realização do procedimento experimental chegou-se à conclusão que a implementação de alimentadores constituídos por machos em areia nas zonas afetadas pelos rechupes é eficaz na eliminação dos mesmos. Durante esta dissertação foi também possível fazer uma pequena comparação entre as peças fornecidas com os resultados obtidos na simulação numérica concluindo que estes apresentam uma boa aproximação à realidade.



## ABSTRACT

---

This thesis studies the topic of casting taps using the low pressure die casting and aims to study the process, the used alloys and common defects of this type of die casting. It was also performed an analyses of defects in a part and submit proposals in order to eliminate those defects.

To better understand the process of Low Pressure Die Casting (LPDC) of copper alloys and related issues, it was carried out a literature review. This is focuses on the process itself, the used alloys, in particular brasses with and without lead, the defects associated to the process and its causes.

Once completed the literature review, the experimental work was initiated where first were analyzed the defects present in a casting brass part made by Low Pressure Die Casting (LPDC) containing solidification shrinkage. After, using numerical simulations of the solidification process and with the knowledge obtained in the literature review, a study was done in order to find the best way to produce the part without defects. This study consisted of an iterative process where simulations were performed to achieve the best solution to solve the problem.

After the experimental work we could conclude that the implementation of feeders mounted inside sand cores in the areas affected by the shrinkage was effective in eliminating of this defect. During this thesis it was also possible to do a comparison between the results obtained from simulation showed to be in good agreement with the real parts.





## AGRADECIMENTOS

---

Em primeiro lugar quero prestar os meus sinceros agradecimentos ao Engenheiro Rui Neto, orientador no INEGI, por todo o seu apoio, disponibilidade, dedicação e pela partilha do seu enorme conhecimento. Quero agradecer a oportunidade de poder aprender e trabalhar consigo não só durante a elaboração desta dissertação mas também durante todo o meu percurso académico na FEUP.

Quero também agradecer à Professora Teresa Duarte, orientadora na FEUP, por todo o acompanhamento, pelos conselhos e críticas que muito me ajudaram na elaboração desta dissertação e sempre foram tidos em conta.

Agradeço também a todos os colaboradores do INEGI que contribuíram, quer de forma direta, quer de forma indireta na realização desta dissertação em especial à Dra. Nannam Song por toda a dedicação e pela disponibilidade na realização de todas as simulações numéricas de solidificação, à Armanda Marques por toda a ajuda e pela disponibilidade na preparação das peças e na realização das análises metalográficas, ao Engenheiro Paulo Machado pelo apoio e pela ajuda no tratamento dos ficheiros CAD relacionados com a minha dissertação e aos restantes colaboradores do CETECOF que me auxiliaram.

Um agradecimento também a todos os colaboradores da empresa CIFIAL pela simpatia e pela boa receção durante as visitas à empresa.

Aos meus pais, Abel Ferreira e Elisabete Gouveia e à minha irmã, Ana Ferreira, um muito obrigado pela compreensão, motivação, apoio e por terem tornado possível todo o meu percurso escolar.

À minha namorada Ana Alves, um especial agradecimento por todo o carinho, apoio e preocupação, não só durante a realização desta dissertação mas também durante toda a minha vida académica.

Por fim quero agradecer aos meus companheiros de trabalho no INEGI, Ricardo Rocha, João Simas, João Pinto e Mafalda Couto, pelas dicas, ajuda e amizade durante esta jornada e a todos os meus amigos e colegas que me acompanharam durante todo o meu percurso académico.



# ÍNDICE DE CONTEÚDOS

---

<b>Resumo .....</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de conteúdos .....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de abreviaturas.....</b>	<b>xxii</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 O Tema .....	1
1.2 As Empresas Envolvidas.....	1
1.3 Enquadramento e Objetivos do Projeto .....	2
1.4 Estrutura da Dissertação .....	3
<b>2 Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	5
2.2 Fundição por Baixa Pressão .....	9
2.2.1 Introdução.....	9
2.2.2 Descrição do Processo.....	11
2.2.3 Vantagens e Desvantagens do Processo.....	17
2.2.4 Defeitos de Fundição.....	18
2.3 Materiais Usados na Produção de Torneiras por Fundição .....	41
2.3.1 O Cobre .....	41
2.3.2 Ligas de Cobre .....	42
2.3.3 Latões .....	44
2.3.4 Refinamento de Grão .....	70
2.4 Materiais Usados em Coquilhas e Machos e suas Características .....	72
2.4.1 As Coquilhas .....	72
2.4.2 Machos .....	79
2.4.3 Temperatura de Vazamento.....	82
2.4.4 Intervalo de Solidificação.....	83
2.4.5 Respiro das Moldações.....	84
2.5 Sistema de Gitagem de Enchimento e Alimentação .....	84
2.5.1 Alimentadores .....	86

2.5.2	Sistema de Gitagem de Enchimento .....	89
<b>2.6</b>	<b>Simulação Numérica .....</b>	<b>90</b>
2.6.1	Método das Diferenças Finitas .....	91
2.6.2	Método dos Elementos Finitos .....	91
2.6.3	Programas Numéricos de Modelação e Simulação .....	93
2.6.4	Crítério de Niyama .....	94
<b>3</b>	<b>Parte Experimental .....</b>	<b>95</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>95</b>
<b>3.2</b>	<b>Identificação do Problema.....</b>	<b>95</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise dos Defeitos da Peça .....</b>	<b>97</b>
<b>3.4</b>	<b>Simulações de Solidificação .....</b>	<b>113</b>
3.4.1	Simulação de Solidificação 1 (Comparação entre Software e Peça Real) .....	115
3.4.2	Simulação de Solidificação 2 (Alteração dos Insertos Metálicos) .....	122
3.4.3	Simulação de Solidificação 3 (Implementação do Alimentador).....	126
3.4.4	Simulação de Solidificação 4 (Comparação entre Temperaturas de Vazamento) 133	
3.4.5	Simulação de Solidificação 5 (Furos Laterais Tapados) .....	137
3.4.6	Simulação de Solidificação 6 (Implementação do Segundo Alimentador).....	141
<b>4</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>153</b>
<b>5</b>	<b>Trabalhos Futuros.....</b>	<b>155</b>
<b>6</b>	<b>Referências .....</b>	<b>157</b>
<b>7</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>161</b>
	ANEXO A – Análise dos defeitos nas amostras C31 e C12 .....	163
	ANEXO B – Propriedades dos materiais usados na simulação .....	167
	ANEXO C – Desenho de Definição – Macho Exterior em Areia .....	173
	ANEXO D – Desenho de Definição – Alimentador .....	177
	ANEXO E – Desenho de Definição – Macho Interior em Areia .....	181

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Linha do tempo do design de torneiras (Campos 2010) .....	6
Figura 2 – Torneira de Esfera (Wagner 2015) .....	7
Figura 3 – Torneira de Compressão (Wagner 2015) .....	7
Figura 4 – Torneira Washerless ou de Cartucho(Wagner 2015).....	8
Figura 5 – Torneira de Disco (Wagner 2015) .....	8
Figura 6 – Esquema para um equipamento de fundição por baixa pressão, adaptado de (Fu et al. 2008) .....	9
Figura 7 – Curva pressão-tempo (P-t) para um enchimento de uma jante automóvel pelo processo de fundição por baixa pressão, adaptado de (Kuo, Hsu, e Hwang 2001).....	13
Figura 8 – Componentes típicos de um sistema de baixa pressão com meia moldação fixa, adaptado de (American Foundrymen's 1993).....	14
Figura 9 – Componentes típicos de um sistema de fundição por baixa pressão com coquilha completamente amovível (Duarte 2014). .....	15
Figura 10 – Unidade de Fundição por Baixa Pressão Automatizada (INDUGA 2015).....	15
Figura 11 – (a): Peça com falha de enchimento. (b): Peça correta. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL).....	20
Figura 12 – Peça com inclusões de escória. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL) .....	21
Figura 13 – Peça com defeito devido à inclusão de bolha de ar. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL) .....	22
Figura 14 – (a): Peça correta. (b): Peça com defeito devido à inclusão de bolha de ar. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL).....	22
Figura 15 - Formas de Rechupes. (a) Tubo primário, (b) cavidades secundárias, (c) porosidade discreta, (d) abatimento, (e) furo (Beeley 2001) .....	24
Figura 16 – Ilustração esquemática das três fases de contração: na fase líquida, durante a solidificação e na fase sólida, adaptado de (Campbell 2011).....	25

Figura 17 – Ilustração esquemática das estruturas de solidificação dos metais: (a) metal puro; (b) liga de grupo I; (c) liga de grupo II (Schmid 2009) .....	28
Figura 18 - Esquema ilustrativo da solidificação das ligas e das temperaturas do metal durante a solidificação (Schmid 2009).....	29
Figura 19 – Peça com rechupe. (Foto tirada na empresa CIFIAL) .....	29
Figura 20 - Peça com dois rechupe. (Foto tirada na empresa CIFIAL) .....	30
Figura 21 - Peça com rechupe. (Foto tirada na empresa CIFIAL) .....	30
Figura 22 – Microestrutura de uma peça da CIFIAL analisada no INEGI sem ataque evidenciando microrechupes interdendriticos .....	31
Figura 23 – Desenvolvimento de tensões de tração e compressão devido às contrações no estado sólido, adaptado de (Beeley 2001)).....	32
Figura 24 – Peça com fissura devido à ocorrência de fissuração a quente (Institute of British 1961). .....	32
Figura 25 – Peça com fissura devido à ocorrência de fissuração a frio (Institute of British 1961) .....	33
Figura 26 – Peça com defeito provocado pela quebra de um macho. (Foto tirada na empresa CIFIAL).....	35
Figura 27 – Peça com defeito devido à deslocação do macho. (Foto tirada na empresa CIFIAL) .....	36
Figura 28 - Peça com defeito devido à deslocação do macho. (Foto tirada na empresa CIFIAL) .....	36
Figura 29 – Peça com rugosidade provocada pelo macho (Dias 2008) .....	37
Figura 30 – Peça com porosidades (Melo 2014).....	38
Figura 31 – À Direita: Peças corretas; À Esquerda: Peças com inclusões de areia; (Dias 2008) 39	
Figura 32 – Peça defeituosa com ponto duro e cauda de cometa (Foto tirada na empresa CIFIAL) .....	40
Figura 33 – Diagrama de fases da liga de Cobre-Zinco, adaptado de (American Society 1961) 44	
Figura 34 – Variação das propriedades mecânicas dos latões quando vazados em coquilha em função do título fictício de cobre (Melo 2014).....	47
Figura 35 – Comparação da Resistência à Tração e da Tensão Limite Elástica da liga ECO BRASS com as ligas C3604, C36782 e SUS304 (Shindoh 2015) .....	56
Figura 36 – Comparação da resistência à corrosão por dezincificação entre a liga ECO BRASS e a liga C3604 (Shindoh 2015) .....	57

Figura 37 – Comparação da resistência à corrosão sob tensão entre a liga ECO BRASS e as ligas C3604 e C3771 (Shindoh 2015).....	57
Figura 38 – Microestrutura da liga ECO BRASS (Shindoh 2015) .....	58
Figura 39 – Microestrutura do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005).....	60
Figura 40 - Microestrutura dos latões (a) CuZn21Si3P, (b) CuZn37, (c) CuZn38As, (d) CuZn42 (A), (e) CuZn42 (W) e (f) CuZn39Pb3 (Nobel et al. 2014) .....	65
Figura 41 – (a) Esforço cortante específico para cada latão estudado; (b) Temperatura da ferramenta durante a maquinagem dos latões estudados; (Nobel et al. 2014) .....	67
Figura 42 – Coquilha construída em liga de Cobre – Berílio (Patternmaking 2015).....	73
Figura 43 – Elementos característicos dos sistemas de gitagem de enchimento e alimentação (Ferreira 1999).....	85
Figura 44 – Peça em estudo.....	96
Figura 45 – Esquema do posicionamento do coletor na montagem da torneira.....	96
Figura 46 – Peça Manifold-U (Peça em estudo) .....	97
Figura 47 – Pontos de peça onde são visíveis os rechupes.....	98
Figura 48 – Planos de corte usados na análise da peça .....	98
Figura 49 – Amostras obtidas após os cortes .....	99
Figura 50 – Amostras C11 e C12 .....	100
Figura 51 – Amostras C21 e C22 .....	100
Figura 52 – Amostras C31 e C32 .....	101
Figura 53 – Posições analisadas na amostra C32 .....	102
Figura 54 – Amostra C32 – Posição 1 – 1000 $\mu\text{m}$ .....	103
Figura 55 – Amostra C32 – Posição 1 – 200 $\mu\text{m}$ .....	103
Figura 56 – Amostra C32 – Posição 2 – 1000 $\mu\text{m}$ .....	104
Figura 57 – Amostra C32 – Posição 2 – 200 $\mu\text{m}$ .....	104
Figura 58 – Amostra C32 – Posição 3 – 1000 $\mu\text{m}$ .....	105
Figura 59 – Amostra C32 – Posição 3 – 200 $\mu\text{m}$ .....	106
Figura 60 – Posições analisadas na amostra C22 .....	106
Figura 61 – Amostra C22 – Posição 5 – 1000 $\mu\text{m}$ .....	107
Figura 62 – Amostra C22 – Posição 5 – 200 $\mu\text{m}$ .....	107

Figura 63 - Amostra C22 – Posição 5 – 200 $\mu\text{m}$ .....	108
Figura 64 – Parte do desenho 2D da peça correspondente à posição da secção da peça C32...	109
Figura 65 – Diâmetros e posição dos furos a efetuar na amostra C32 .....	109
Figura 66 – Posição dos rechupes relativamente à linha de centro dos furos (Amostra C32) ..	110
Figura 67 – Parte do desenho 2D da peça correspondente à posição da secção da peça C22 e C12 .....	110
Figura 68 – Diâmetro e posição dos furos a realizar na amostra C22.....	111
Figura 69 – Posição dos rechupes relativamente à linha de centro dos furos (Amostra C22) ..	111
Figura 70 – Diâmetro e posição dos furos a realizar na amostra C12.....	112
Figura 71 – Posição dos rechupes relativamente à linha de centro dos furos (Amostra C12) ..	112
Figura 72 – Sistema de gitagem e alimentação usado na simulação de solidificação 1 .....	115
Figura 73 – Macho de areia interior usado na simulação de solidificação 1.....	115
Figura 74 – Parte direita da coquilha .....	116
Figura 75 – Parte esquerda da coquilha incluindo os insertos metálicos. Enchimento realizado no sentido demonstrado pela seta.....	116
Figura 76 – Distribuição da fração sólida no plano XZ central (Simulação 1).....	118
Figura 77 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 1) .....	119
Figura 78 – Corte A-A .....	119
Figura 79 – (a) - Distribuição da fração sólida do corte A-A; (b)- Distribuição dos rechupes no corte A-A (à direita); (Simulação 1).....	120
Figura 80 – Corte B-B.....	121
Figura 81 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte B-B;(b)-Distribuição dos microrechupes no corte B-B (à direita); (Simulação 1).....	121
Figura 82 – Comparação entre os resultados da simulação de solidificação 1 com a peça real	122
Figura 83 – Esquema da substituição dos machos na peça (Simulação 2).....	123
Figura 84 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 2) .....	124
Figura 85 – Corte A-A .....	124
Figura 86 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte A-A; (b)-Distribuição dos microrechupes no corte A-A; (Simulação 2) .....	125
Figura 87 – Porção da peça usada no cálculo do alimentador (Simulação 3) .....	126
Figura 88 – Valores do volume e da superfície determinadas no SolidWorks (Simulação 3) ..	127



Figura 89 – Configuração dos alimentadores usados na simulação de solidificação 3 .....	128
Figura 90 – Macho em areia usado na simulação de solidificação 3 .....	129
Figura 91 – (a)-Macho interior original (Sem alterações); (b)-Macho interior com as alterações efetuadas.....	129
Figura 92 – Peça com alimentadores e machos usados na simulação de solidificação 3.....	130
Figura 93 – Distribuição da fração sólida no corte XZ pelo plano central (Simulação 3) .....	131
Figura 94 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 3) .....	132
Figura 95 - Distribuição dos rechupes do corte A-A (Simulação 3) .....	133
Figura 96 – Sistema de gitagem e alimentação usado na simulação de solidificação 4.....	134
Figura 97 – Sistema de alimentação e gitagem com macho do alimentador usado na simulação 4 .....	135
Figura 98 - (a)-Distribuição dos rechupes (Tvazamento – 950° (Simulação3); (b)-Distribuição dos rechupes (Tvazamento 1025°) (Simulação 4).....	135
Figura 99 – (a)-Distribuição dos rechupes (Tvazamento - 950°) (Simulação 3); (b)-Distribuição dos rechupes (Tvazamento 1025°) (Simulação 4).....	136
Figura 100 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte B-B;(b)-Distribuição dos microrechupes no corte B-B; (Simulação 4).....	137
Figura 101 – Sistema de gitagem e alimentação usada na simulação de solidificação 5 .....	138
Figura 102 – Distribuição da fração sólida no plano XZ central.(Simulação 5).....	139
Figura 103 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 5) .....	140
Figura 104 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte B-B; (b) -Distribuição dos microrechupes no corte B-B; (Simulação 5).....	141
Figura 105 – Porção da peça usada no cálculo do alimentador (Simulação 6) .....	142
Figura 106 – Valores do volume e da superfície determinado no SolidWorks (Simulação 6) .	143
Figura 107 – Comprimento máximo do alimentador (Simulação 6).....	144
Figura 108 – Posição dos alimentadores na peça (Simulação 6).....	145
Figura 109 – Configuração dos alimentadores usados na simulação de solidificação 6.....	146
Figura 110 – Macho em areia usado na simulação de solidificação 6 .....	147
Figura 111 – Peça com alimentadores e machos usados na simulação de solidificação 6.....	147
Figura 112 – Distribuição da fração sólida em dois momentos diferentes na solidificação (Simulação 6) .....	148

Figura 113 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 6) .....	149
Figura 114 – Distribuição dos rechupes do corte B-B (Simulação 6) .....	150
Figura 115 – Distribuição dos microrechupes do corte B-B (Simulação 6).....	151
Figura 116 – Posições analisadas na amostra C31 .....	163
Figura 117 – Amostra C31 – Posição 4 – 1000 $\mu\text{m}$ .....	164
Figura 118 – Amostra C31 – Posição 4 – 200 $\mu\text{m}$ .....	164
Figura 119 – Posições analisadas na amostra C12 .....	165
Figura 120 - Amostra C12 – Posição 6 – 1000 $\mu\text{m}$ .....	166
Figura 121 - Amostra C12 – Posição 6 – 200 $\mu\text{m}$ .....	166
Figura 122 – Composição química da liga usada nas simulações.....	167
Figura 123 – Condutividade Térmica da liga (W/m-K) vs. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	168
Figura 124 – Densidade da liga ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) vs. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	168
Figura 125 – Fração Sólida vs. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	169
Figura 126 – Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de liquidus e solidus da liga usada nas simulações.....	169
Figura 127 - Condutividade Térmica da areia de sílica (W/m.K) vs. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	170
Figura 128 – Calor específico da areia de sílica ( $\text{KJ}/\text{Kg.K}$ ) vs. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	170
Figura 129 – Composição química do aço C45E (Ck45).....	171
Figura 130 - Condutividade Térmica do aço C45E (Ck45) (W/m-K) vs. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )....	171

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Contração na solidificação de alguns metais, adaptado de (Campbell 2011).....	26
Tabela 2 – Forma de solidificação de algumas ligas (Society 1984) .....	27
Tabela 3 – Coeficiente de expansão linear, ponto de fusão e contração linear aproximada para alguns metais no estado sólido (Beeley 2001). .....	34
Tabela 4 – Composição química dos latões C83600, C8400 e C85800 (Society 1984) .....	48
Tabela 5 – Características dos latões C83600, C84400 e C85800 (AFS 2014; SeBiLOY Sem data) .....	49
Tabela 6 – Composição química do latão C36000 (Free Cutting Brass)(Metals 2015).....	49
Tabela 7 – Classificação de maquinagem dos latões C83600, C84400 e C85800 (AFS 2014)..	50
Tabela 8 – Composição química das ligas EnviroBrass I, EnviroBrass II e EnviroBrass III (SeBiLOY) .....	52
Tabela 9 – Comparação das propriedades mecânicas das ligas EnviroBrass I, EnviroBrass II e EnviroBrass III com outros latões (SeBiLOY Sem data; CES Edupack 2015) .....	53
Tabela 10 – Comparação da classificação de maquinagem das ligas EnviroBrass com outros latões (SeBiLOY Sem data) .....	54
Tabela 11 – Comparação das características de fundição das ligas EnviroBrass com outros latões (SeBiLOY Sem data) .....	55
Tabela 12 - Comparação das características de processamento das ligas EnviroBrass com outros latões (SeBiLOY Sem data) .....	55
Tabela 13 – Composição química da liga ECOBRASS (Shindoh 2015).....	56
Tabela 14 – Composição química do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005) .....	59
Tabela 15 – Propriedades do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005) .....	59
Tabela 16 – Características do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005) .....	60

Tabela 17 – Composição química das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015) .....	61
Tabela 18 – Propriedades mecânicas das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015) .....	62
Tabela 19 – Propriedades relativamente à corrosão das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015) .....	62
Tabela 20 – Propriedades de processamento das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015) .....	63
Tabela 21 – Latões usados no estudo de (Nobel et al. 2014) .....	64
Tabela 22 – Características mecânicas e térmicas dos latões estudados por (Nobel et al. 2014) .....	66
Tabela 23 – Composição química dos latões examinados no estudo de (La Fontaine e Keast 2006) .....	68
Tabela 24 – Composição da ligas usadas no estudo de (M. Sadayappan 2004).....	71
Tabela 25 – Composição química das ligas CuBe2 e CuNi2Be (Schmelzmetall 2006) .....	74
Tabela 26 – Propriedades mecânicas das ligas CuBe2 e CuNi2Be (Schmelzmetall 2006) .....	75
Tabela 27 – Características das ligas CuBe2 e CuNi2Be (Schmelzmetall 2006) .....	76
Tabela 28 – Composição química das ligas CuCrZr e CuNi2Si (AFIR 2014) .....	77
Tabela 29 – Propriedades mecânicas das ligas CuCrZr e CuNi2Si (AFIR 2014).....	78
Tabela 30 – Características das ligas CuCrZr e CuNi2Si (AFIR 2014).....	78
Tabela 31 – Processos de fabrico de machos com meio de cura a quente (Dias 2008) .....	80
Tabela 32 – Principais características dos tipos de areia (Dias 2008).....	81
Tabela 33 – Tipos de areia (Dias 2008) .....	82
Tabela 34 – Temperatura de vazamento de algumas ligas (Mesquita 1978) .....	83
Tabela 35 – Coeficientes de segurança (Ferreira 1999).....	88
Tabela 36 – Comparação entre o MDF e MEF (Santos 2014).....	92
Tabela 37 – Composição química da liga de cobre usada na CIFIAL (CuZnBi).....	114
Tabela 38 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 1.....	117
Tabela 39 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 2.....	123
Tabela 40 – Valores do volume e da superfície de arrefecimento da porção da peça (Simulação 3) .....	127
Tabela 41 – Dimensões do alimentador usado (Simulação 3) .....	128

Tabela 42 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 3.....	131
Tabela 43 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 4.....	134
Tabela 44 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 5.....	138
Tabela 45 – Valores de volume e da superfície de arrefecimento da porção da peça (Simulação 6). .....	143
Tabela 46 – Dimensões teóricas do alimentador (Simulação 6) .....	144
Tabela 47 – Dimensões do alimentador usado (Simulação 6) .....	145
Tabela 48 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 6.....	148



## LISTA DE ABREVIATURAS

---

AFS	<i>American Foundry Society</i>
BBIM	<i>Brass and Bronze Ingot Manufacturers</i>
CAD	<i>Computed Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CCC	Estrutura Cristalina Cubica de Corpo Centrado
CDA	<i>Copper Development Association</i>
CETECOF	Unidade de Fundição e Novas Tecnologias
CFC	Estrutura Cristalina Cubica de Faces Centradas
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
DEMEGI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
DIAM	Estrutura Cristalina Tipo Diamante
EPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HC	Estrutura Cristalina Hexagonal Compacta
ID&I	Investigação e Desenvolvimento
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
LPDC	<i>Low Pressure Die Casting</i> (Designação Inglesa) – Fundição em Coquilha por Baixa Pressão (Designação Portuguesa)
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MTL	<i>Materials Technology Laboratory</i>

NSF	<i>National Sanitation Foundation</i>
ROMB	Estrutura Cristalina Romboédrica
TETRAG	Estrutura Cristalina Tetragonal



# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 O Tema

O tema desta dissertação é centrado na fundição de peças em ligas de cobre obtidas através do processo de vazamento por baixa pressão. Tendo isto em conta, a presente dissertação irá apresentar um estudo aprofundado do processo de fundição por baixa pressão, bem como dos materiais usados na fundição de torneiras em ligas de cobre e dos problemas que esse tipo de fundição apresenta.

Considerando esses defeitos serão realizadas simulações e testes de forma a tentar encontrar uma solução para os problemas e defeitos encontrados nas peças.

Outro ponto em que esta dissertação se irá focar é no facto de a concentração de chumbo nos latões usados para o fabrico de torneiras ser restringido por lei neste momento devido ao facto de este elemento ser prejudicial para a saúde. O facto de mudar o tipo de ligas que se usavam por ligas novas, estas constituídas por elementos diferentes das ligas antigamente usadas faz com que apareçam defeitos nas peças, levando então a pensar numa solução para minimizar esses defeitos.

## 1.2 As Empresas Envolvidas

As empresas participantes neste projeto são: o INEGI e a CIFIAL.

A CIFIAL S.G.P.S SA. é uma empresa sediada em Rio Meão, fundada em 1904, sendo uma das maiores empresas de produção de ferragens, torneiras, acessórios e material sanitário, fechaduras, entre outros.

Esta empresa usa o processo de fundição por baixa pressão na maior parte das peças metálicas que produz.

A CIFIAL iniciou a sua atividade de produção de peças usando o forjamento, posteriormente passando para a estampagem automatizada e após usarem a fundição por gravidade adotaram a fundição por baixa pressão. Também nos acabamentos a CIFIAL evoluiu muito passando do polimento manual para o polimento automatizado usando agora um acabamento em PVD (*Physical Vapour Deposition*).

Pode-se então concluir que esta é uma empresa com grande avanço tecnológico e sempre a implementar novas técnicas e produtos.

O INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) é uma instituição de interface entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a indústria. Este instituto foi fundado em 1986 no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI, atualmente DEMec) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Nestes últimos 25 anos tem desenvolvido e consolidado uma posição de parceiro da indústria em projetos de ID&I sendo que a representação desses projetos, a par da consultoria, cerca de 60% da sua atividade.

O INEGI tem o estatuto de “Utilidade Pública” e com a figura jurídica de “Associação Privada sem Fins Lucrativas”, e assume-se como uma gente no desenvolvimento do tecido industrial Português e na transformação do modelo competitivo da indústria nacional.

A política de qualidade adotada pelo INEGI assenta em promover a melhoria contínua do desempenho da Organização na concretização dos seus objetivos operacionais e estratégicos, procurando elevar, permanentemente, o nível de satisfação de todas as partes interessadas.

Esta instituição possui um enorme conjunto de meios que suportam a sua atividade como oficinas destinadas ao desenvolvimento de componentes e pré-séries, laboratórios destinados à realização de trabalhos experimentais e um vasto conjunto de ferramentas informáticas como por exemplo programas de CAD 3D, CAE, ABAQUS, ProCAST, entre outros.

A Relação entre o INEGI e a CIFIAL já existe há bastante tempo e este projeto é mais um exemplo do trabalho conjunto destas duas empresas.

### **1.3 Enquadramento e Objetivos do Projeto**

O trabalho realizado nesta dissertação surge de um projeto do INEGI em conjunto com a CIFIAL e tem como principal objetivo o controlo do aparecimento de defeitos em peças em latão vazadas através do processo de fundição por baixa pressão.

O objetivo desta dissertação é estudar o problema e encontrar a solução para reduzir ou mesmo eliminar os defeitos existentes numa peça produzida pela CIFIAL. Todas as propostas de resolução dos problemas serão suportadas pela simulação numérica recorrendo a um software de simulação através do método dos elementos finitos.

Será realizada uma vasta pesquisa bibliográfica relativamente ao processo e às ligas de cobre usadas, bem como aos defeitos comuns deste tipo de fundição.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação tem como estrutura base a estrutura dos documentos de dissertação que é estabelecido pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Inicialmente é apresentado o tema a tratar, bem como os objetivos da presente dissertação, os agradecimentos a todos os intervenientes e uma pequena introdução.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica do estado da arte relativamente ao tema tratado. Este capítulo é importante para nos situarmos e aprender factos sobre o tema para posteriormente o trabalho de simulação e análise ser feito com um bom conhecimento do assunto.

No terceiro capítulo é apresentada a descrição e a metodologia usada na realização da parte experimental da dissertação. Neste capítulo serão explicados todos os estudos e propostas para o sistema de gitagem e alimentação que visa resolver o problema assim como a análise dos resultados de cada simulação

No quarto e quinto capítulo estão apresentadas as conclusões e as propostas de trabalho futuro.

Por fim apresentam-se as referências utilizadas na elaboração da dissertação e os anexos referentes ao trabalho realizado.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Introdução

Uma torneira, em termos funcionais, é basicamente uma válvula que serve de elo de ligação entre o reservatório ou abastecimento e o utilizador. De acordo com a definição, é um “peça tubular provida de uma espécie de chave que permite fechar, abrir e regular o escoamento de um líquido ou gás contido num recipiente ou disponível numa canalização” (Moreira 2014).

A torneira tem uma história interessante que reporta para os tempos passados. Anteriormente a 1700, as canalizações e as torneiras eram usadas para controlar a água em fontes pública e em casas. Os romanos usavam canalizações e torneiras para levar a água até banhos públicos, banhos privados, cisternas de abastecimento e fontes.

As torneiras começaram, passado algum tempo, a usar dois acionadores, um para água quente e outro para água fria. Em 1937, Al Moen queimou as suas mãos com água quente e decidiu criar uma torneira com apenas um acionador. O seu *design* inicial foi rejeitado e após vários anos de estudo, entre 1940 e 1945, Al Moen conseguiu criar uma torneira de apenas um acionador que funcionasse corretamente. A partir dessa data as pessoas poderiam controlar a temperatura da água com apenas um acionador (PlumbingHelpToday 2011; Campos 2010).

Muitos outros inventores continuaram a desenvolver a torneira e o seu *design*. Então, em 1945, Landis Perry apareceu com o *design* de uma válvula de esfera para torneiras. A torneira de acionador único da Delta foi a primeira torneira a usar este tipo de válvula. Depois, a Wolvering Brass adicionou funcionalidade às torneiras pelo *design* de discos de cerâmica para substituir os discos de borracha, que se degradam mais rapidamente.

Com o passar dos tempos várias alterações foram feitas e houve bastantes melhoramentos como por exemplo a adição de filtros para reduzir os contaminantes na água, bocais pulverizadores, torneiras eletrônicas, bem como *designs* especiais para pessoas com limitações físicas.

Recentemente foram criadas as torneiras com sensor para que se possa usar a torneira sem tocar e com isso aumentar o nível de higiene durante a utilização da torneira (PlumbingHelpToday 2011).

Na Figura 1 pode-se ver uma linha do tempo do *design* das torneiras.

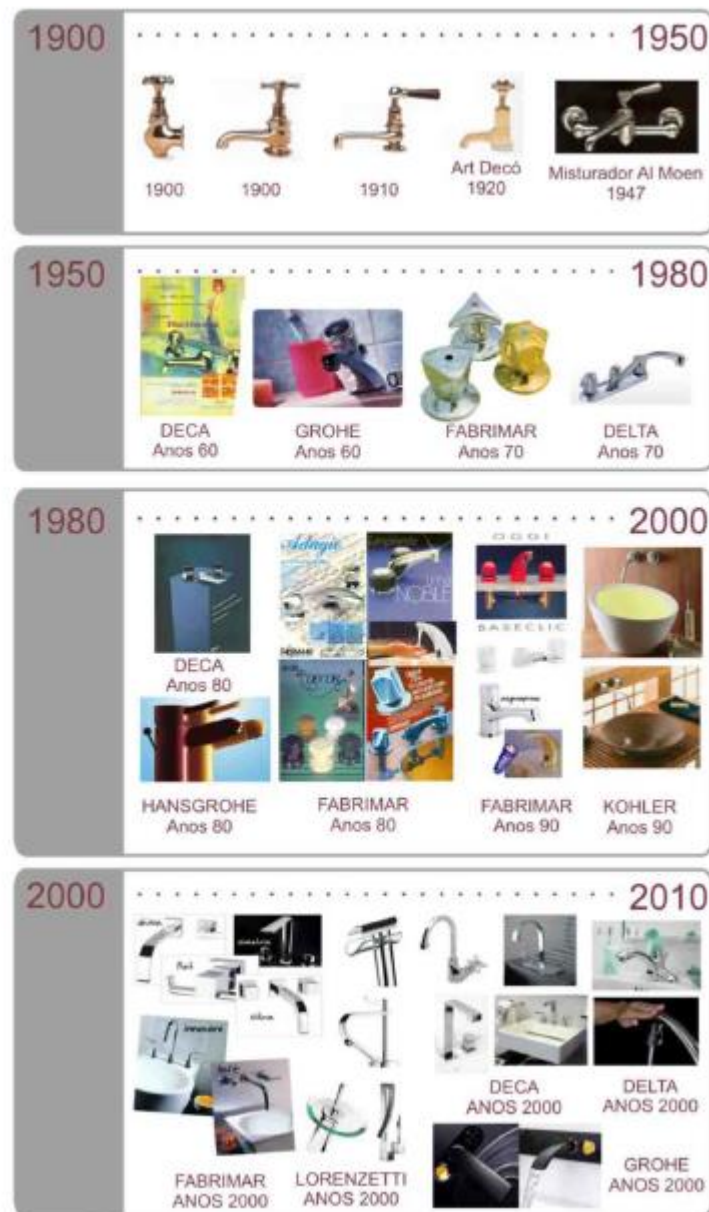


Figura 1 – Linha do tempo do design de torneiras (Campos 2010)

Um aspecto de interesse são os formatos e os tipos de torneiras existentes.

Apesar de haver torneiras com formatos tão distintos e haver uma grande variedade de torneiras, isso apenas depende do design, pois apenas existem quatro tipos de torneiras, que são (Elliott 2015):

- Torneiras de Esfera – Este tipo de torneiras usa um acionador giratório e têm uma junta esférica situada no centro da torneira. O acionador giratório tem como função controlar o fluxo de água bem como controlar a temperatura. É uma torneira muito fácil de identificar através do seu *design*. É a maior parte das vezes instalada em cozinhas e casas de banho. Porém, as torneiras de esfera são constituídas por muitas peças e são propensas a ganhar fugas. Este tipo de torneira pode ser visto, em detalhe, na Figura 2.



*Figura 2 – Torneira de Esfera (Wagner 2015)*

- Torneira de Compressão – Estas torneiras eram mais usadas antigamente e são conhecidas por terem dois acionadores, uma para água quente e outro para água fria, cada um com uma válvula que permite controlar o fluxo de água. Este tipo de torneira contém um vedante de pressão. Estas torneiras são muito conhecidas por pingar pois o vedante costuma deteriorar-se e levar a perda de pressão e consequente fuga de água. Este tipo de torneira pode ser visto, em detalhe, na Figura 3.



*Figura 3 – Torneira de Compressão (Wagner 2015)*

- Torneira “Washerless” - São também nominadas por torneiras de cartucho e este tipo de torneiras é conhecido por não usar anilhas usando sim um cartucho para controlar o fluxo de água. Podem ter um ou dois acionadores. Os modelos de um único acionador utilizam o movimento vertical (para cima e para baixo) para controlar o fluxo de água e a rotação

para regular a temperatura. As torneira “Washerless” não usam anilha e por isso, as fugas de água não são tão comuns. Este tipo de torneira pode ser visto, em detalhe, na Figura 4.



*Figura 4 – Torneira Washerless ou de Cartucho(Wagner 2015)*

- Torneira de Disco – É um sistema relativamente novo onde a torneira utiliza um cilindro central e dois discos de cerâmica, um que se move e outro que não, para controlar fluxo de água e a temperatura. É uma torneira muito fiável no que respeita a fugas de água. É o tipo de torneira mais cara de todas e são dadas boas garantias, mesmo sobre os cilindros centrais. Este tipo de torneira pode ser visto, em detalhe, na Figura 5.



*Figura 5 – Torneira de Disco (Wagner 2015)*



Nesta dissertação, as peças em estudo não são as torneiras propriamente ditas, mas sim peças constituintes do sistema de canalização que permitem as torneiras funcionarem e que fazem parte do conjunto vendido. Mais à frente nesta dissertação, na secção 3.2, é mostrada a peça em questão bem como a sua função.

## 2.2 Fundição por Baixa Pressão

### 2.2.1 Introdução

O processo de fundição por baixa pressão é um processo “*near net shape*”. É um processo que combina alta precisão com boa eficiência e as peças finais tem um bom acabamento (Mi Guofa 2008). Este é um processo que se enquadra no processo de fundição por moldações permanentes (Castings 2015). Neste processo são utilizadas coquilhas, também conhecidas como moldações permanentes, onde o vazamento acontece a uma baixa pressão, entre 0.3 a 0.7 bar. O enchimento da moldação acontece de baixo para cima, a baixa velocidade o que permite controlar facilmente o vazamento e assim evitar possíveis defeitos visto que ao utilizar uma baixa velocidade de enchimento consegue-se controlar muito bem o problema da turbulência no enchimento (Campbell 2011; Kurtz 2007).

O equipamento tipicamente usado neste processo de fundição pode ser visto na Figura 6.

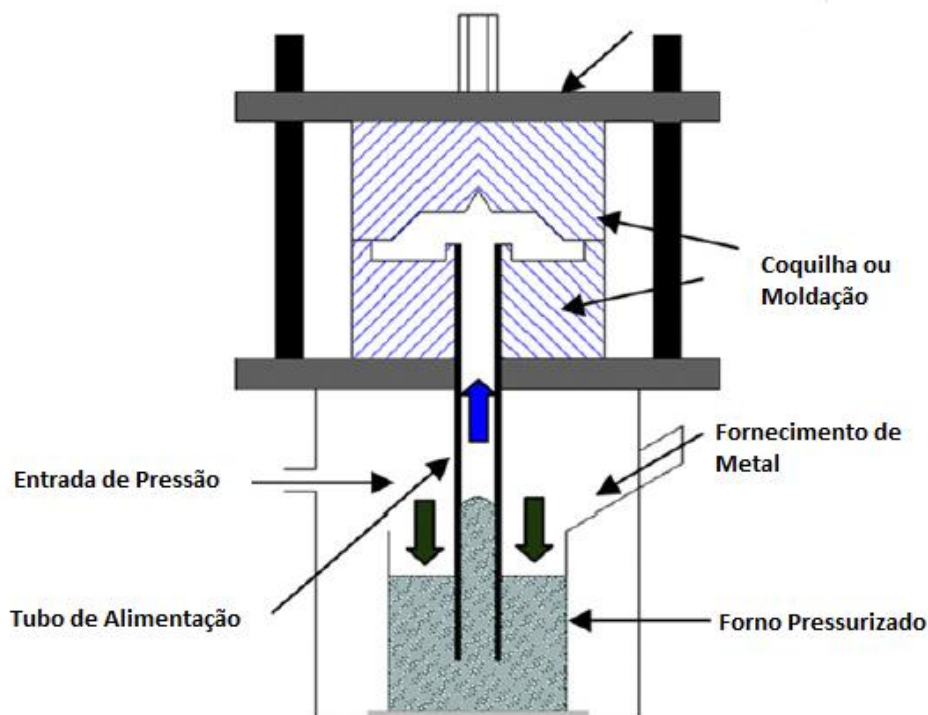


Figura 6 – Esquema para um equipamento de fundição por baixa pressão, adaptado de (Fu et al. 2008)

Este processo usa por vezes uma pressão superior mas apenas para reduzir as porosidades que possam existir. Porém, a pressão usada é de aproximadamente 1 bar, o que é cerca de 1% da pressão usada na fundição por alta pressão.

Este processo permite obter uma grande precisão e controlo durante o enchimento, o que leva a obtenção de peças com ótimas propriedades mecânicas e elevada qualidade.

A fundição por baixa pressão é muito usada na produção de peças automóveis, principalmente jantes e pistões que requerem uma boa integridade das peças, e no caso das jantes, além da boa integridade, deve ter também boa aparência (Campbell 2011).

É bastante simples automatizar o processo de fundição por baixa pressão e com isso fazer com que apenas um funcionário possa controlar um grande número de máquinas e assim diminuir o tempo de processo (Campbell 2011).

Para perceber melhor o processo de fundição por baixa pressão é necessário conhecer o equipamento típico e seus componentes usados neste tipo de fundição.

Os componentes que constituem o equipamento são os seguintes (Brown 1999):

- Moldação ou Coquilha (Permanente e/ou móvel);
- Tubo de Alimentação;
- Entrada de Pressão;
- Forno ou Cadinho Pressurizado.

**Moldação ou Coquilha** ( Figura 6): As moldações usadas no processo de fundição por baixa pressão podem ser feitas em aço, ferro fundido ou em ligas de cobre de alta resistência. É também usado um revestimento que é aplicado por spray ou por mergulho.

Na maior parte das vezes é usada uma moldação com plano de apartação horizontal, onde os fundidos ficam retidos na meia moldação superior e com isso deixa de ser necessário o uso de extratores. Não poderia ser de outra forma pois, normalmente, abaixo da meia moldação inferior está o forno pressurizado. Quando a meia moldação superior é levantado após o arrefecimento da peça fundida, os ejtores colidem com a placa extratora para libertar a peça.

As moldações são usualmente arrefecidas a ar ou água através de canais de refrigeração ou por mergulho. As moldações com canais de arrefecimento são caras e complicadas, mas possuem o recorde do tempo de produção em algumas peças, principalmente em peças automóveis. No caso das jantes uma moldação não arrefecida pode ter um tempo de ciclo de 5 minutos enquanto que para a mesma peça, tendo a moldação um sistema de refrigeração, a mesma peça poderá ter um tempo de ciclo de 2 minutos. Para o caso de peças maiores, como é o caso de blocos de motor, 15 minutos é o tempo normal de processo (Campbell 2011).

**Tubo de Alimentação** ( Figura 6): é um gito disposto na posição vertical que vai buscar metal fundido diretamente da parte intermédia do forno. Isso permite obter a melhor qualidade do metal fundido pois no meio do banho não existem escórias nem outro tipo de substâncias que contaminam o metal. É necessário ter em conta que o metal poderá arrefecer no tubo e solidificar, portanto, para evitar que isso aconteça, o tubo de alimentação é aquecido na parte superior garantindo assim uma boa qualidade do material fundido (Brown 1999).

**Entrada de Pressão** (Figura 6): É o tubo por onde se insere a pressão necessária para pressurizar o forno (Brown 1999).

**Forno ou Cadinho Pressurizado** (Figura 6): Todo o forno está inserido numa câmara pressurizada e selada por uma junta na tampa superior. O metal fundido é conservado nesse estado através de uma rede de resistências elétricas para garantir que este não solidifique no cadinho. O metal contido nele é normalmente suficiente para vaziar 10 peças, no mínimo. Quando necessário, poderá ser reabastecido pelo material fundido num outro forno através de um bocal. É necessário ter em atenção o material usado na construção do cadinho e o material fundido que este irá conter para garantir que o material fundido não destrua o cadinho (Brown 1999).

### 2.2.2 Descrição do Processo

O equipamento de fundição por baixa pressão funciona tendo em conta a Teoria de Pascal.

Um gás seco é usado para pressurizar a superfície do metal fundido, que está contido no cadinho, com uma pressão relativamente baixa para ultrapassar a diferença de altura entre a coquilha e a superfície do metal fundido no cadinho de forma a forçar o metal a subir pelo tubo de pesca, pelo alimentador e pelo sistema de gitagem, e consequentemente encher a cavidade da moldação. Por vezes, após a cavidade estar completamente preenchida pelo metal fundido, a pressão é aumentada de forma a pressurizar a coquilha e consequentemente a peça fundida para que o metal preencha os espaços criados devido à contração do material durante o arrefecimento. Depois de a moldação estar completamente cheia e solidificada já se pode retirar a pressão exercida sobre o sistema e assim, o metal que ainda se encontra no tubo de alimentação, que não está solidificado escorre para o cadinho novamente e pode ser reutilizado (Kuo, Hsu, e Hwang 2001; Luo 2013).

Para aprofundar o estudo sobre o processo de fundição por baixa pressão é necessário perceber melhor as etapas que compõem o processo.

Na primeira etapa, é como já referido, aplicada uma pressão na superfície do banho de metal fundido para forçar o material a subir pelo tubo de alimentação e chegar à moldação. A pressão necessária para que este fenómeno aconteça pode ser calculada através do princípio de Pascal onde (Kuo, Hsu, e Hwang 2001; Kurtz 2007):

$$p = \rho * H$$

Em que:

p – Pressão a aplicar;

$\rho$  – Densidade do metal fundido;

H – Diferença de altura entre o topo do tubo de alimentação e a superfície do metal fundido;

A segunda etapa corresponde ao momento em que é aplicada uma pressão um pouco mais alta para forçar o metal a entrar na cavidade da moldação. Esta fase, apesar de ser uma desvantagem no que respeita ao tempo de processo pois é uma fase demorada, é muito importante para garantir uma boa qualidade das peças finais. Porém, a pressão a ser usada nesta fase é mais difícil de calcular do que na fase anterior. O cálculo desta pressão envolve variáveis como o formato da peça, a velocidade de enchimento e as secções da peça a fundir. Neste caso, a melhor forma de ultrapassar o problema é usando programas de simulação (Kuo, Hsu, e Hwang 2001).

Na terceira etapa, como já referido, retira-se a pressão do forno pressurizado e pode-se então proceder à abertura da moldação após a solidificação do material.

Um ponto a ter em grande consideração durante o processo de fundição por baixa pressão é o controlo da pressão exercida no interior do forno durante a segunda etapa, visto que esta pressão irá influenciar a velocidade de enchimento da coquilha e por sua vez a turbulência ou não desse fluxo de metal fundido pelo tubo de enchimento. Não tendo em atenção este aspeto o enchimento pode ser defeituoso e provocar defeitos como inclusões de gás nos fundidos. Este tipo de erros podem ser mais comuns quando as peças possuem formas mais complexas. Durante a segunda fase do processo a velocidade de enchimento deverá ser o mais rápida possível mas tem que garantir que o escoamento não é turbulento para que não ocorram inclusões de ar. Para tal tem que se ter em conta o Numero de Reynolds para o escoamento laminar num tubo. Esse número é dado pela seguinte expressão (Kuo, Hsu, e Hwang 2001; Kurtz 2007; Mi Guofa 2008):

$$Re = D * v * \rho / \mu,$$

Em que:

$Re$  – Número de Reynolds;

$D$  – Diâmetro do tubo de alimentação;

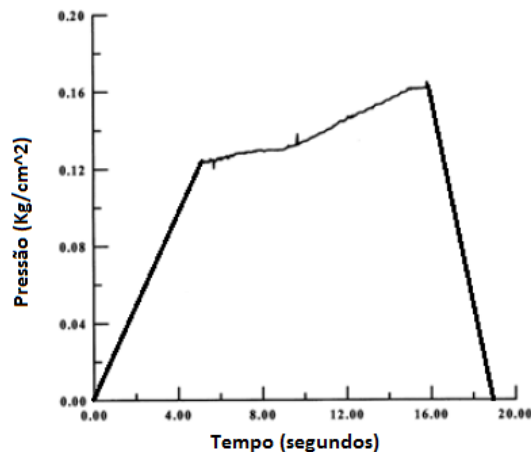
$\rho$  – Densidade do metal fundido;

$\mu$  – Viscosidade do metal fundido;

$v$  – Velocidade do escoamento;

Para que o escoamento seja laminar, tem que se garantir que o Número de Reynolds seja inferior a 2100, no caso de o escoamento estar disposto horizontalmente. No caso da fundição por baixa pressão, o tubo está disposto na vertical e dependendo do metal usado o Número de Reynolds pode ser um pouco mais alto (Kuo, Hsu, e Hwang 2001; Kurtz 2007; Mi Guofa 2008).

Na Figura 7 pode-se ver um gráfico que demonstra a variação da pressão ( $P$ ) ao longo do tempo durante o enchimento de uma jante automóvel pelo processo de fundição por baixa pressão.

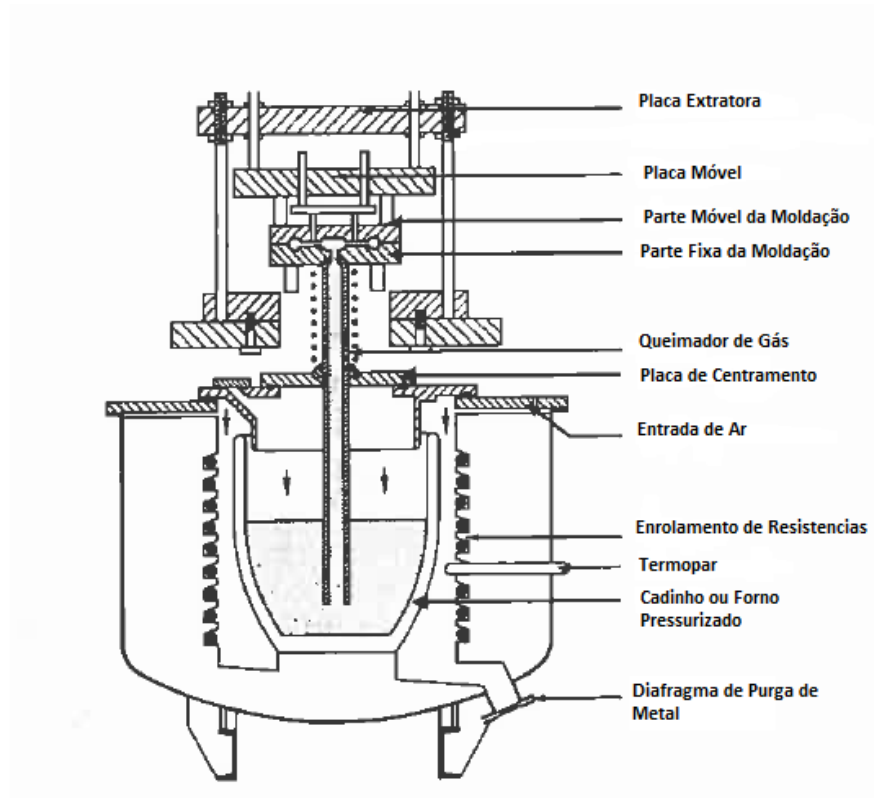


*Figura 7 – Curva pressão-tempo (P-t) para um enchimento de uma jante automóvel pelo processo de fundição por baixa pressão, adaptado de (Kuo, Hsu, e Hwang 2001)*

#### 2.2.2.1 Soluções Construtivas do Processo

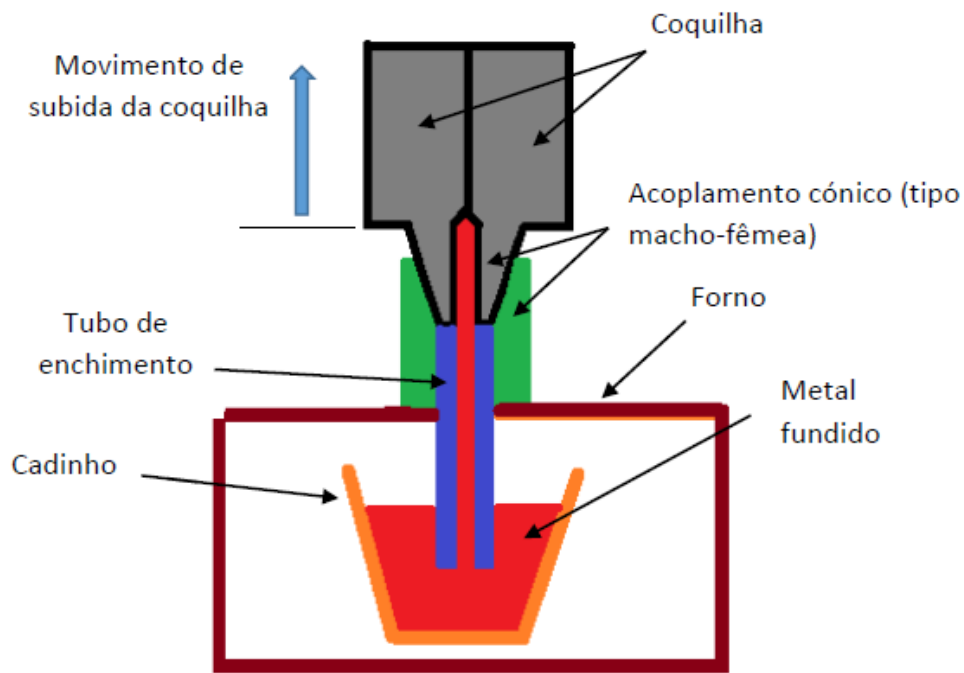
Na fundição em coquilha por baixa pressão podem ser usadas dois tipos de coquilhas:

- **Coquilha composta por uma meia moldação fixa e uma meia moldação móvel com plano de separação horizontal** – A moldação inferior fixa é montada na placa base, diretamente em cima do forno, situada na zona inferior da coquilhadora. A meia moldação móvel move-se na direção vertical relativamente a meia moldação fixa (Brown 1999). A Figura 8 mostra um esquema de uma solução construtiva deste género.



*Figura 8 – Componentes típicos de um sistema de baixa pressão com meia moldação fixa, adaptado de (American Foundrymen's 1993)*

- **Coquilha completamente amovível com plano de separação vertical** – Nesta solução construtiva, a coquilha é fechada fora do forno sendo depois montada por cima do tubo de enchimento, que faz a ligação entre o metal fundido e a coquilha. Após o processo de enchimento e posterior solidificação a moldação é retirada e a desmoldação é feita noutro local. Quando se desmonta a moldação, o tubo de enchimento fica exposto ao ar e deve haver certos cuidados para não contaminar o banho de metal. Durante o processo de enchimento deve-se garantir a vedação entre o tubo de enchimento e a coquilha e isso normalmente faz-se através de uma montagem do tipo macho-fêmea ou com um sistema cónico. (Duarte 2014). A Figura 9 mostra um esquema de um equipamento deste género.



*Figura 9 – Componentes típicos de um sistema de fundição por baixa pressão com coquilha completamente amovível (Duarte 2014).*

Na Figura 10 está apresentada uma unidade de fundição por baixa pressão. Esta unidade é muito similar à unidade usada na empresa CIFIAL.



*Figura 10 – Unidade de Fundição por Baixa Pressão Automatizada (INDUGA 2015)*

Esta unidade de fundição, segundo (INDUGA 2015), possui um forno e um manipulador robótico e permite um elevado grau de automatização. Possui também um sistema automático de alimentação do forno, bem como de revestimento e refrigeração da coquilha por mergulho.

### **2.2.2.2 Revestimento das Coquilhas**

Para qualquer um dos tipos de coquilhas acima apresentados é necessário o uso de uma camada de desmoldante/refrigerante para revestir a coquilha. Estes revestimentos tem como principal função aumentar a vida útil das coquilhas pois funcionam como uma barreira entre as superfícies da moldação e o metal fundido durante a formação da primeira película de metal solidificado (Ferreira 1999). Os revestimentos são semelhantes aos usados na fundição por gravidade. Este revestimento é aplicado através de um spray ou por mergulho enquanto a coquilha está a uma temperatura entre 120° C – 200° C para que o revestimento seque rapidamente quando entra em contacto com as paredes da coquilha e por isso não escorra. Por isso, a coquilha deverá ser aquecida até uma temperatura superior à temperatura de trabalho antes de iniciar a fundição. O tempo que um revestimento dura dentro da coquilha e o seu ciclo de aplicação deve ser aperfeiçoado pela experiência. Uma boa limpeza da coquilha também é necessária para garantir a qualidade das peças fundidas (Brown 1999).

O revestimento é à base de grafite e água e tem a função de desmoldante, lubrificante e refrigerante.

Basicamente, os revestimentos são uma suspensão de grafite coloidal em água sem sais minerais. A proporção de grafite varia entre 8 a 10% relativamente à massa de água. A grafite deverá conter, no mínimo, 75% de carbono, a temperatura não deverá ser superior a 60° C e a densidade deve estar entre 1.025 e 1.075. Durante a aplicação deve-se garantir que a coquilha se encontra a uma temperatura de aproximadamente 150° C no caso dos latões. Isto é necessário para garantir a evaporação da água rapidamente e garantir que o revestimento adere bem à coquilha (Melo 2014).

O revestimento da coquilha com esta solução é muito importante para garantir a boa qualidade do vazamento e, consequentemente, a boa qualidade das peças fundidas. As principais vantagens deste revestimento são (Society 1984):

- Facilitar a ejeção da peça pois lubrifica a cavidade da moldação;
- Refrigerar a moldação através da evaporação da água presente no revestimento;
- Melhorar a qualidade superficial das peças finais;
- Prevenir a soldadura do metal vazado à cavidade da moldação;
- Promover a ocorrência da solidificação direcional pois fornece isolamento;
- Expulsar os óxidos provocados pela volatilização do zinco através da evaporação da água quando entra em contacto com a coquilha quente;
- Controlar o coeficiente de transferência de calor entre a moldação e a peça.



### 2.2.3 Vantagens e Desvantagens do Processo

Tal como todos os processos, este também tem vantagens e desvantagens. De seguida estão apresentadas as principais vantagens do processo de fundição por baixa pressão (Brown 1999; Reikher e Barkhudarov 2007; B. Bonatto 2005; Duarte 2014; Zhang, Maijer, e Cockcroft 2007):

- Grande facilidade em usar sistemas automatizados o que permite a diminuição do número de trabalhadores necessários;
- Grande facilidade de uso de automatismos que permitem movimentar peças de elevado porte;
- Elevada qualidade das peças fundidas;
- Geração de peças com excelentes propriedades mecânicas pois usa um sistema de alimentação de baixa velocidade e isso diminui a probabilidade de ocorrerem inclusões de ar;
- Ao utilizar o metal da parte intermédia do banho de metal fundido obtém-se peças com poucas impurezas;
- As peças finais têm boa qualidade e aparência, pelo que existe uma menor necessidade de maquinagem;
- Permite um bom compromisso entre a qualidade, a complexidade e a produtividade das peças finais;
- Há uma grande variedade de ligas que podem ser usadas neste processo, que confere uma grande diversidade de peças;
- Dado a simplicidade do sistema de gitagem e dos alimentadores, é um processo que oferece uma boa rentabilidade do material sendo possível desperdiçar apenas 5 a 10% do material;
- Permite utilizar machos não permanentes e com isso aumenta a diversidade de peças que se podem produzir;
- Permite fabricar peças com geometrias complicadas devido à utilização de machos em areia;
- O processo permite uma solidificação direcional ajudando a reduzir os rechupes.

As desvantagens inerentes deste processo são as seguintes (Brown 1999; Duarte 2014; Zhang, Maijer, e Cockcroft 2007):

- Existe a possibilidade da existência de impurezas no banho de metal fundido proveniente do arrasto de impurezas que estejam no tubo de alimentação quando o metal não usado na peça volta ao forno. O metal não usado ao cair no banho gera turbulência neste e poderá introduzir impurezas. Segundo (Brown 1999) há a possibilidade de usar um filtro de espuma cerâmico (SIVEX FC) e com isso reduzir em muito a quantidade de impurezas que passam para o banho de metal;
- O processo tem falhas na produção de peças muito pequenas;
- A cadência de produção deixa um pouco a desejar quando comparado com a fundição injetada por alta pressão;
- Comparando com a fundição por gravidade é possível obter peças com espessuras bastante mais finas mas não tão finas como é possível obter através da fundição injetada por alta pressão;
- É complicado controlar finamente a aplicação do desmoldante e isso traz problemas dimensionais nas peças fundidas.

Após o estudo do processo de fundição por baixa pressão pode-se concluir que os parâmetros mais relevantes a ter em conta no processo são os seguintes (Brown 1999; Duarte 2014; Zhang, Maijer, e Cockcroft 2007):

- Pressão a aplicar no forno pressurizado;
- Sobrepressão a aplicar na segunda etapa do processo;
- Temperatura de vazamento;
- Velocidade de vazamento;
- Tempo de vazamento;
- Temperatura da coquilha;
- Aplicação do revestimento.

Segundo (Krishna 2001) os atributos relativos ao processo de fundição por baixa pressão em moldações permanentes são os seguintes:

- Alta resistência à tração;
- Resistência a fadiga mediana;
- Resistência ao impacto mediana;
- Alta integridade das peças vazadas;
- Custo de ferramentas baixo;
- Custo de produção baixo.

#### **2.2.4 Defeitos de Fundição**

Todas as peças provenientes do processo de fundição contém imperfeições que afetam a qualidade final do produto, mas nem todas as imperfeições são consideradas defeitos. Estas imperfeições só são vistas como defeitos ou falhas quando a função ou aparência da peça estão em causa. É então necessário fazer uma análise para aferir se existe a possibilidade de reparação da peça, ou se é viável sendo em casos mais graves necessário rejeitar a peça. A rejeição de uma peça não depende só do defeito mas depende também do seu efeito na funcionalidade ou estética da peça (Beeley 2001).

As principais origens dos defeitos nas peças de fundição são (Beeley 2001):

- Projeto da Peça
- Método de produção
- Erros humanos

Um defeito pode ter apenas uma origem das mencionadas acima ou resultar de uma combinação de fatores sendo neste caso um problema mais difícil de solucionar. Todos os trabalhadores em empresas de fundição estão familiarizados com os defeitos que normalmente aparecem nas peças que produzem e por vezes com o seu desaparecimento espontâneo. É necessário haver mais precaução nos casos onde um certo defeito é muito suscetível de acontecer sendo necessário por vezes uma alteração no *design* da peça quando não é possível fazer alterações no processo ou as alterações no processo não funcionam.

É também claro que o estudo e as alterações para a eliminação de defeitos na fundição deve ter em conta as questões económicas. Os custos de medidas preventivas e procedimentos de controlo devem ser comparados com os custos de reparação e rejeição das peças. Rejeitar uma peça após

todo o processo de fundição, maquinagem, polimento e acabamento estar concluído é muito caro comparado com a rejeição da peça logo após sair da fundição. É necessário detetar os defeitos o mais cedo possível (Beeley 2001).

Em (Beeley 2001), Peter Beeley agrupa os defeitos que surgem nas peças fundidas em 7 grupos, dependendo das suas origens nas peças. Os grupos são:

1. Defeitos de forma que surgem no vazamento;
2. Inclusões e defeitos originados pelas areias;
3. Defeitos gasosos;
4. Defeitos de contração devido às contrações volumétricas que ocorrem no processo de solidificação do material;
5. Defeitos de contração ocorridos no estado sólido;
6. Erros dimensionais;
7. Erros de composição e segregação das ligas.

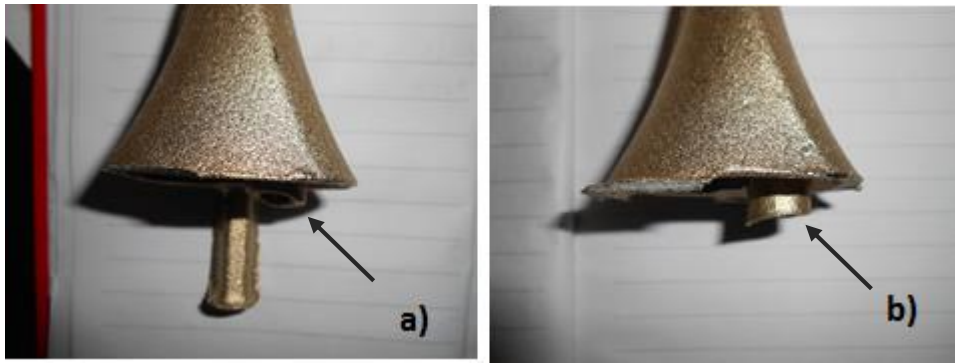
#### 1 - Defeitos de forma que surgem no vazamento

Quando o metal líquido entra na cavidade da moldação, o primeiro requisito é que o metal encha, de forma satisfatória, as cavidades da moldação e desenvolva um bom acabamento superficial em todos os pontos de contacto com a moldação. Quando este requisito não é cumprido podem surgir os seguintes erros (Beeley 2001):

- **Mal Cheio** (*Misrun ou Short-Run*) – Acontece quando uma zona da peça não é cheia.
- **Juntas Frias** (*Cold Laps*) – Acontece quando o metal não flui livremente na superfície da moldação originando intermitências que são visíveis na peça após a solidificação.
- **Gotas Frias** (*Cold Shuts*) – Acontece devido a diferentes direções de fluxo originando grandes descontinuidades de metal.

O primeiro sinal de que poderão acontecer os defeitos acima descritos é o aparecimento de cantos e bordas arredondadas e falha de material em detalhes finos da moldação. Estes erros estão normalmente associados à temperatura de vazamento do metal fundido, pois quando este é vazado a temperatura demasiado baixa, não tem a fluidez e a vazabilidade necessárias. Pode também ocorrer devido a um arrefecimento da moldação ou a um mau projeto do sistema de gitagem (Beeley 2001).

Na Figura 11 (a) e (b) pode-se ver uma comparação entre uma peça correta e uma peça com um defeito de forma.



*Figura 11 – (a): Peça com falha de enchimento. (b): Peça correta. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL)*

Na Figura 11 (a) a peça tem um defeito de forma por falta de enchimento onde o metal não preencheu toda a cavidade da moldação. Na Figura 11 (b) a peça não contém defeito de forma.

## 2 - Inclusões e defeitos originados pelas areias

As inclusões não metálicas em peças de fundição podem ser separadas em dois grupos (Beeley 2001):

- Inclusões Endógenas
- Inclusões Exógenas

As inclusões endógenas são originadas por pequenas partículas que permanecem em suspensão no metal líquido durante a fase de vazamento ou que se podem precipitar devido a alterações de solubilidade durante o arrefecimento. Este tipo de inclusões podem ser encontradas dispersas por toda a peça e a sua origem é no processo de fusão ou na liga usada. A formação de inclusões endógenas tem como responsáveis reações que envolvem impurezas como o oxigénio, o azoto e enxofre sendo que estes interagem com os constituintes mais reativos das ligas (Duarte 2014).

A minimização das inclusões endógenas passa principalmente pelo grande domínio do processo de fundição, nomeadamente a utilização de critérios de seleção de cargas mais apertados e técnicas de fusão mais refinadas (Marques 2010).

As inclusões exógenas são constituídas por matérias não originárias do próprio metal provenientes da desagregação das moldações e das ferramentas que se encontram em contacto com o metal no estado líquido, contribuindo para o aparecimento de escórias. Podem-se evitar estas escórias através da utilização de filtros cerâmicos ou através da decantação das escórias antes do vazamento (Duarte 2014).

Na Figura 12 pode-se ver um exemplo de uma inclusão de escória numa peça vazada.



*Figura 12 – Peça com inclusões de escória. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL)*

### 3 - Defeitos gasosos

Os gases podem estar presentes nas peças fundidas como solução, como compostos químicos ou no interior das cavidades. Os gases podem ser resultantes do aprisionamento de ar durante o vazamento, podem ser precipitados durante a solidificação do metal, resultado da reação química ou de uma alteração da solubilidade com a temperatura, ou devido à evolução do contacto entre o metal líquido e material presente na moldação, como por exemplo machos.

Estes defeitos assumem a forma de bolhas internas, golpes de superfície e cavidades intergranulares, sendo estes defeitos dependentes de causas diferentes.

Os poros gasosos apresentam, normalmente, uma forma arredondada, mas em certos casos a forma é dependente de outros fatores como, por exemplo, no caso da porosidade intergranular, onde os defeitos apresentam uma forma côncava, tendo origem na interface sólido-líquido formando-se durante a solidificação.

As inclusões de gases podem causar outro tipo de condições defeituosas como a fragilização e fissuração resultante da retenção de gases em solução no estado sólido (Beeley 2001).

As causas que originam os defeitos gasosos podem variar bastante mas é possível separá-las em dois grupos que são:

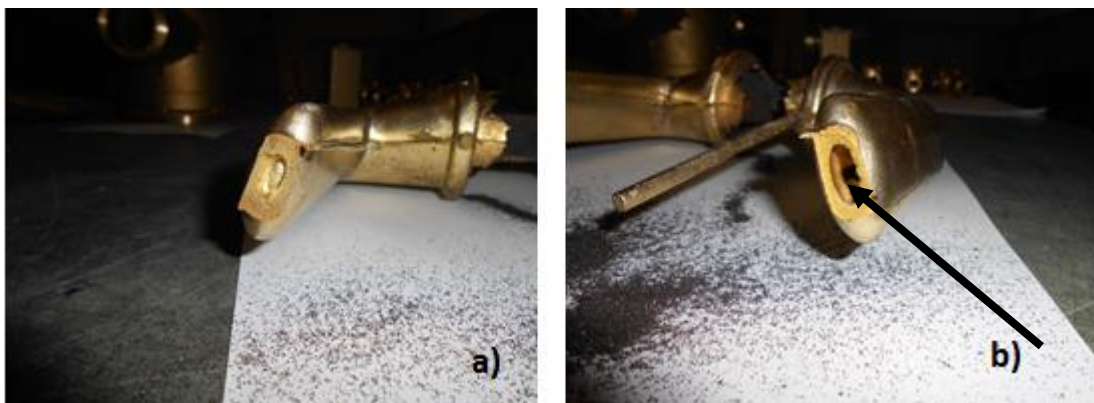
- Causados por aprisionamento físico durante o vazamento;
- Decorrente da rejeição do metal durante a fase de arrefecimento.

Na Figura 13 pode-se ver um exemplo de uma peça com defeito devido à inclusão de uma bolha de ar.



*Figura 13 – Peça com defeito devido à inclusão de bolha de ar. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL)*

Na Figura 14 (a) e (b) pode-se comparar uma peça boa (à esquerda) com uma peça com defeito gasoso (à direita), nomeadamente a inclusão de bolha de ar.



*Figura 14 – (a): Peça correta. (b): Peça com defeito devido à inclusão de bolha de ar. (Fotos tiradas na empresa CIFIAL)*

Neste caso, na peça boa (Figura 14 (a)), ainda se pode ver que existe uma inclusão de ar mas este defeito não afeta a peça pois está posicionado no alimentador.

#### 4 - Defeitos de contração devido às contrações volumétricas que ocorrem no processo de solidificação do material.

Este tipo de defeito é também conhecido como contração no estado líquido. Os defeitos de contração no estado líquido aparecem quando a compensação de falta de metal líquido na altura

da solidificação não foi conseguida. A sua ocorrência deve-se a um inadequado sistema de alimentação. A forma destes defeitos é dependente das condições de arrefecimento e do design da peça a produzir (Beeley 2001).

Este tipo de cavidades é derivado da falta de fornecimento de metal ou um mau cálculo da direção de solidificação durante o arrefecimento.

Durante o processo de solidificação da liga, ocorre uma contração volumétrica que está associada à passagem do metal do estado líquido para o estado sólido. Por isso, se a contração não for compensada com metal líquido vai originar um vazio, chamado de rechupe. Quanto maior for a contração volumétrica da liga, maior será a tendência para a formação de rechupes. Como já referido, para evitar este tipo de defeitos é necessário colocar alimentadores próximos das zonas das peças que solidificam em último lugar (pontos quentes) bem como deverá ser garantida a solidificação direcional das peças para que os rechupes seja transportados para fora das peças (Duarte 2014; Marques 2010).

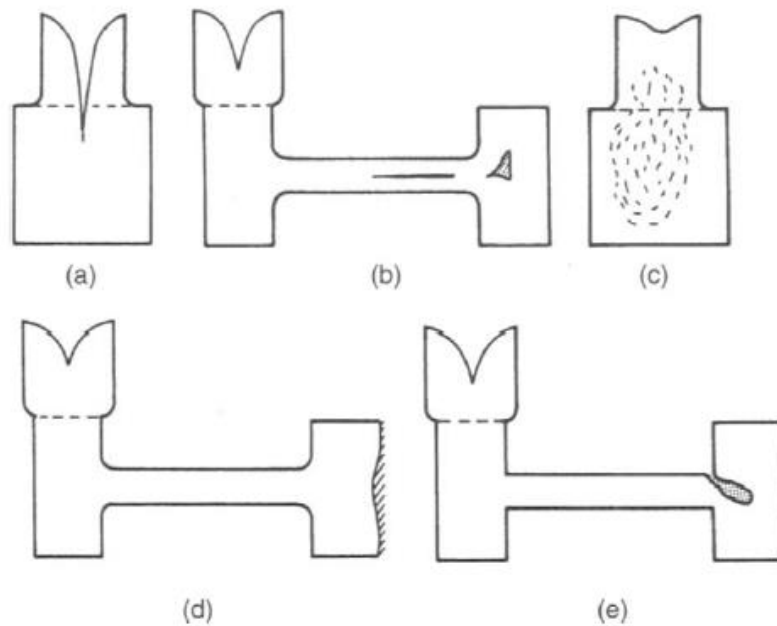
Segundo (Ferreira 1999), as contrações no estado líquido podem originar os seguintes defeitos:

- Rechupe – Vazio grande aberto ou fechado, resultante da contração não compensada no estado líquido e durante a solidificação. Localiza-se nas zonas mais volumosas que solidificam em último lugar, ou seja, nos pontos quentes. Este defeito volúmico apresenta superfícies rugosas, por vezes interdendríticas. Deve-se procurar estes defeitos junto dos alimentadores, das junções, dos machos e dos ataques de enchimento.
- Rechupe Axial – Vazio com a mesma origem do rechupe, localizado no plano ou eixo central de secções cilíndricas, prismáticas ou em forma de placa. É um defeito, geralmente de origem planar, de superfície irregular, muitas das vezes interdendrítico, ramificando-se por uma dada área.
- Microrechupe ou porosidade – Vazios com a mesma origem do rechupe e do rechupe axial podendo apresentar a forma de uma porosidade fina com aspeto esponjoso, frequente em ligas com um grande intervalo de solidificação. Tem, geralmente, uma distribuição interdendrítica volúmica localizada nos pontos quentes. Pode-se apresentar sobre a forma de um microporosidade difundida em todo o volume da peça ou numa parte dela. Estes defeitos aparecem geralmente nas partes maciças das peças.
- Rechupe Angular – Cavidades que afloram à superfície, como uma mistura de vazio de contração e fenda. É normalmente atribuído à ação simultânea de contração, libertação de gases e pressão atmosférica. É um defeito que aparece junto a ângulos reentrantes das peças vazadas.

Segundo (Beeley 2001), existem rechupes que podem ser corrigidos por maquinaria pois aparecem à superfície da peça.

Os microrechupes ocorrem a maior parte das vezes no interior das peças e podem aparecer por baixo de rechupes grandes. Por vezes, após maquinaria desaparecem deixando a peça esteticamente e dimensionalmente correta mas microscopicamente existem falhas que podem comprometer o funcionamento correto da peça.

Na Figura 15 pode-se ver os diferentes tipos de rechupes (Beeley 2001).



*Figura 15 - Formas de Rechupes. (a) Tubo primário, (b) cavidades secundárias, (c) porosidade discreta, (d) abatimento, (e) furo (Beeley 2001)*

Como referido atrás, os defeitos de contração no estado líquido são formados durante a solidificação do metal.

Segundo (Campbell 2011), o metal líquido presente no forno ocupa consideravelmente um volume maior que o metal solidificado e isso apresenta problemas para a fundição. Existem três fases no regime de arrefecimento de um metal e consequentemente três tipos de contração diferentes (Bibby 1999; Campbell 2011). Na Figura 16 pode-se ver as três diferentes fases de arrefecimento para um metal.



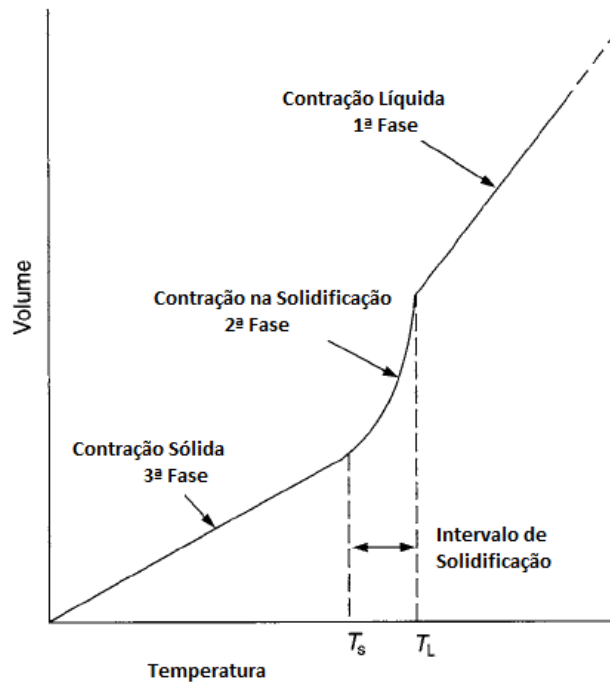


Figura 16 – Ilustração esquemática das três fases de contração: na fase líquida, durante a solidificação e na fase sólida, adaptado de (Campbell 2011)

As fases presentes no regime de arrefecimento são (Campbell 2011):

- 1ª Fase – Enquanto a temperatura diminui, o metal líquido começa a contrair. Este é a contração térmica normal que se pode ver no mercúrio de um termómetro. Nesta fase, o volume de metal reduz quase linearmente com a diminuição da temperatura. Nesta fase, a contração do metal não é um problema para o processo de fundição pois a contração é pequena e é facilmente controlada pois a compensação através de metal líquido é de fácil execução.
- 2ª Fase – Contração na solidificação é a fase onde aparecem problemas significativos, nomeadamente rechupes e microrechupes. Esta contração ocorre no ponto de solidificação devido à grande diferença de densidade entre o estado sólido e o estado líquido. Nesta fase ocorre a reorganização da estrutura cristalina e na ordem dos cristais levando à contração volumétrica do metal.
- 3ª Fase – Contração no estado sólido é expressa no fator de contração dos metais e pode levar a empenos, deformações plásticas incluindo a fissuração a frio.

Na Tabela 1 estão apresentados os valores de contração durante o arrefecimento de alguns metais.

Tabela 1 – Contração na solidificação de alguns metais, adaptado de (Campbell 2011)

<b>Metal</b>	<b>Estrutura Cristalina</b>	<b>Ponto de Fusão (C°)</b>	<b>Densidade no Estado Líquido (kgm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Densidade no Estado Sólido (kgm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Alteração do Volume (%)</b>
<b>Alumínio</b>	CFC	660	2368	2550	7.14
<b>Cobre</b>	CFC	1083	7938	8382	5.30
<b>Níquel</b>	CFC	1453	7790	8210	5.11
<b>Chumbo</b>	CFC	327	10665	11020	3.22
<b>Ferro</b>	CCC	1536	7035	7265	3.16
<b>Zinco</b>	HC	420	6577	-	4.08
<b>Bismuto</b>	ROMB	271	10034	9701	-3.32
<b>Silício</b>	DIAM	1410	2525	-	-2.9
<b>Estanho</b>	TETRAG	232	6986	7166	2.51

Como referido atrás, o aparecimento dos rechupes e dos microrechupes têm origem nas contrações durante o arrefecimento das ligas. Por isso, é necessário conhecer muito bem como se desenvolve a solidificação das ligas de cobre pois um sistema de enchimento e alimentação que funciona bem como uma liga pode não funcionar quando a liga é diferente.

Em (Society 1984), as ligas de cobre são divididas em dois grupos para definir a sua forma de solidificação.

- Grupo I – Solidificação em “Pele” (*Alloys Freezing by Skin Formation*) - Este grupo engloba as ligas com um baixo intervalo de solidificação.
- Grupo II – Solidificação em “Pasta” (*Alloys Freezing by Mushy Manner*) – Este grupo engloba as ligas com um largo intervalo de solidificação.

O modo de solidificação do metal é um pouco diferente entre os dois grupos.

Nas ligas de Grupo I, a solidificação começa assim que a temperatura do metal junto à moldação baixa para a temperatura de solidificação do metal. O início da solidificação é marcado pela formação de pequenos cristais contra as paredes da moldação. Os cristais que possuem as orientações mais favoráveis começam a crescer rapidamente, tanto para o lado como para dentro, ligando-se com a vizinhança, formando uma pele ou casca contínua de metal solidificado, conhecida como frente de solidificação. A frente de solidificação, que é a fronteira entre o metal sólido e o metal líquido vai avançando para o interior da peça em direção perpendicular à moldação. Este grupo de ligas dá origem a grandes rechupes superficiais e buracos, na maior parte das vezes no meio das peças devido ao arrefecimento direcional (Society 1984).

Nas ligas de Grupo II, a solidificação inicia-se também com a deposição de numerosos cristais nas paredes das moldações. Porém, o crescimento dos cristais é interrompido pois estes cristais contêm muito poucos elementos de liga, comparando com o metal líquido de onde foi formado. Quando estes cristais são formados os átomos dos elementos de liga são rejeitados e inseridos no metal líquido enriquecendo-o destes elementos. Isso faz com que o ponto de solidificação do metal baixe e assim o crescimento dos cristais é interrompido. Contudo a temperatura do metal líquido vai diminuindo nas zonas não próximas a estes cristais formados e isso cria um novo conjunto de cristais solidificados fora da área enriquecida. O aparecimento destes cristais visa criar uma nova área enriquecida e este processo repete-se até os cristais nuclearem em toda a peça. Em ligas de Grupo II pode-se considerar que se mantêm fluídas até se encontrarem 70 % sólidas. Após este ponto inicia-se a contração da liga, sendo que o nome dado a este estágio é *mass feeding*. Neste estágio ocorre uma reorganização dos cristais e a sua tentativa de compactação. Nesta fase, onde os cristais já se encontram na sua posição final e não se mexem, as dendrites instalam-se nas pequenas bolsas de líquido e, não havendo metal líquido para compensar, originam-se microrechupes (Melo 2014; Society 1984)

Na Tabela 2 estão apresentadas algumas ligas divididas nos grupos referidos:

*Tabela 2 – Forma de solidificação de algumas ligas (Society 1984)*

<b>Grupo I – Solidificação em “Pele”</b>	<b>Grupo II – Solidificação em “Pasta”</b>
Cobre Desoxidado	Bronze de Estanho
Cobre O.F.H.C	Bronze de Chumbo
Cobre “Tough Pitch”	Latão Vermelho
Cobre – Crômio	Latão Semi-Vermelho
Cobre – Telúrio	Prata de Níquel
Cobre – Cadmio	
Cobre – Berílio	
Bronze de Manganês	
Latão Amarelo	
Bronze de Alumínio	
Bronze de Silício	
Bronze de Manganês e Alumínio	
Cupronickel	

A forma como o metal solidifica depende bastante da composição química da liga. Uma liga com baixa quantidade de elementos de liga comporta-se de forma diferente durante a solidificação comparando com uma liga com uma grande quantidade de elementos de liga (Society 1984).

Na Figura 17 (a), (b) e (c) podemos ver a estrutura de solidificação de um metal puro (a) comparado com uma liga de Grupo I (b) e com uma liga de Grupo II (c):

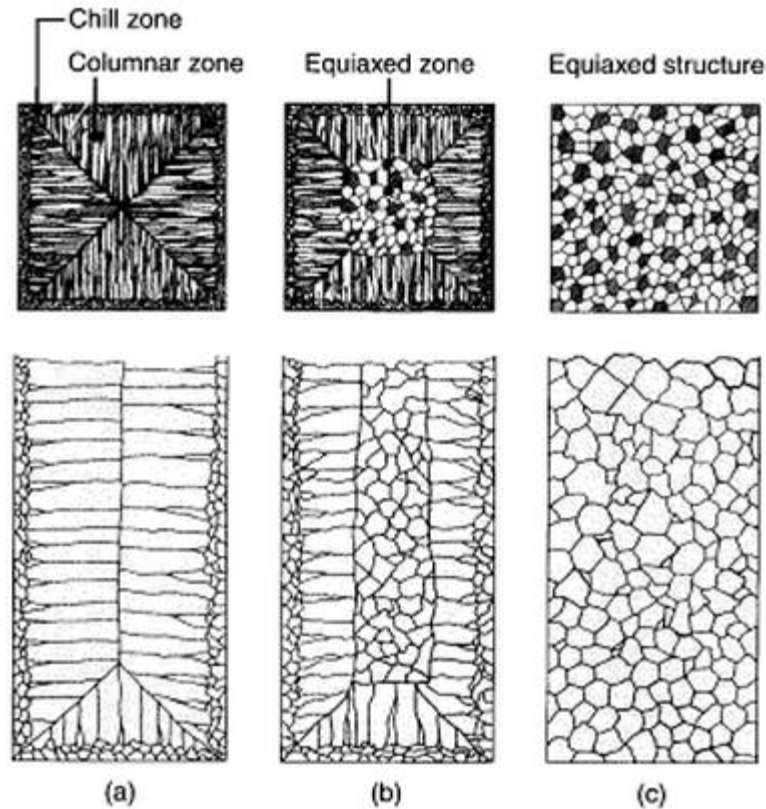


Figura 17 – Ilustração esquemática das estruturas de solidificação dos metais: (a) metal puro; (b) liga de grupo I; (c) liga de grupo II (Schmid 2009)

Pode ser visto na Figura 18 que os metais puros possuem um intervalo de solidificação que se aproxima de zero e a frente de solidificação move-se como uma pele sem a ocorrência de “*Mushy zone*”. As ligas eutéticas solidificam de maneira diferente dos metais puros e a estrutura que desenvolvem após a solidificação depende da composição do eutético. Em ligas com um diagrama de fase simétrico, a estrutura é em geral lamelar, quando têm duas ou mais fases, pode variar de liga para liga (Schmid 2009).

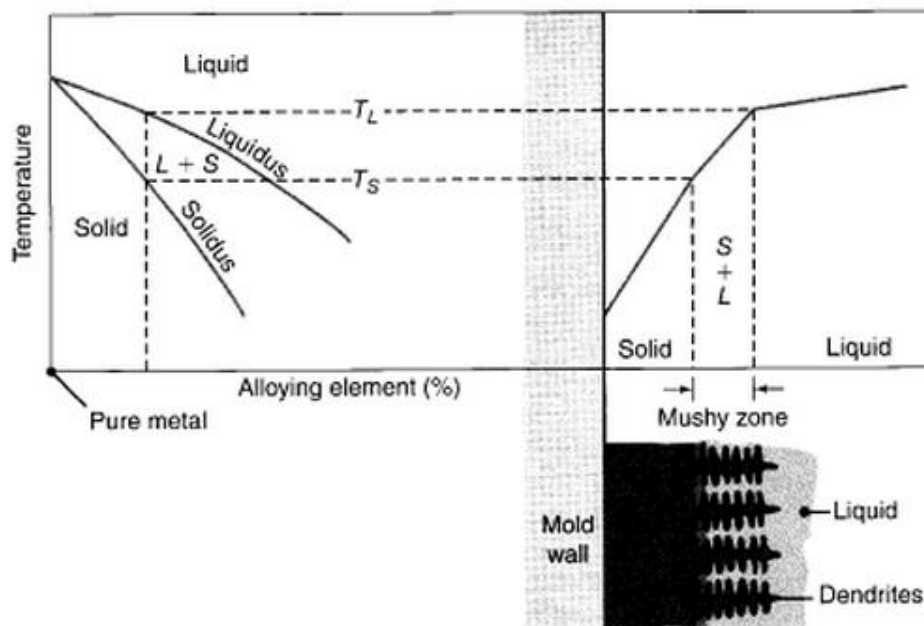


Figura 18 - Esquema ilustrativo da solidificação das ligas e das temperaturas do metal durante a solidificação (Schmid 2009)

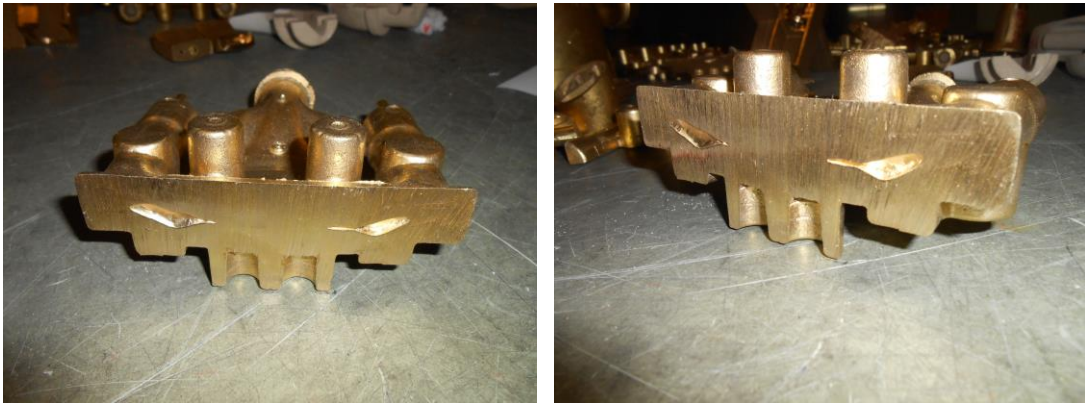
É então muito importante saber o tempo de solidificação das ligas usadas na fundição. Mais a frente, nesta dissertação, será abordado o tema e as fórmulas de cálculo dos tempos de solidificação.

Na Figura 19 pode-se ver um exemplo de uma peça com rechupe.



Figura 19 – Peça com rechupe. (Foto tirada na empresa CIFIAL)

Na Figura 20 pode-se ver mais um exemplo de uma peça com defeito, neste caso uma peça onde ocorreram dois rechupes.



*Figura 20 - Peça com dois rechupe. (Foto tirada na empresa CIFIAL)*

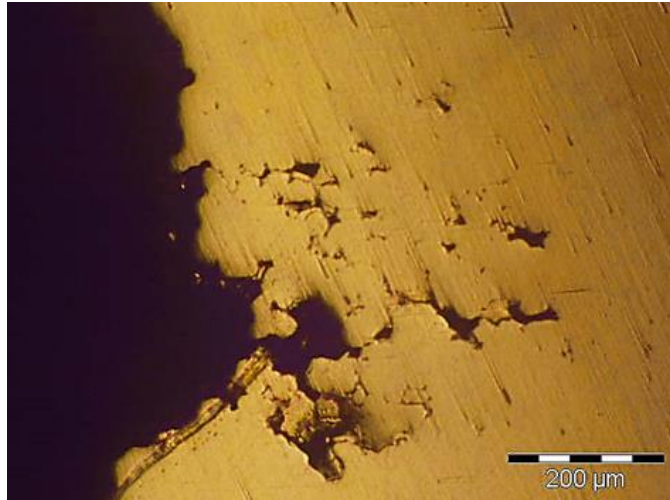
Neste caso, os rechupe estão situados num ponto interno da peça, apenas sendo visível através do corte de peça.

Na Figura 21 mostra-se mais um exemplo de uma peça com rechupe.



*Figura 21 - Peça com rechupe. (Foto tirada na empresa CIFIAL)*

Na Figura 22 pode-se ver um exemplo de um microrechupe.



*Figura 22 – Microestrutura de uma peça da CIFIAL analisada no INEGI sem ataque evidenciando microrechupes interdendríticos*

#### 5 - Defeitos de contração ocorridos no estado sólido

O arrefecimento da liga desde a temperatura de *solidus* até a temperatura ambiente também provoca contração do metal. Ao contrário da contração na mudança de estado, que poderá ser compensada através de um fluxo de metal líquido, as contrações no estado sólido afetam todas as dimensões lineares da peça. Por isso, todas essas contrações são tidas em conta no desenho e projeto da peça (Duarte 2014; Marques 2010).

A contração no estado sólido inicia-se imediatamente após a formação de uma massa significativa de metal solidificado. Visto que o metal, na prática, nunca contrai livremente, são geradas tensões internas que poderão originar defeitos nas peças (Duarte 2014).

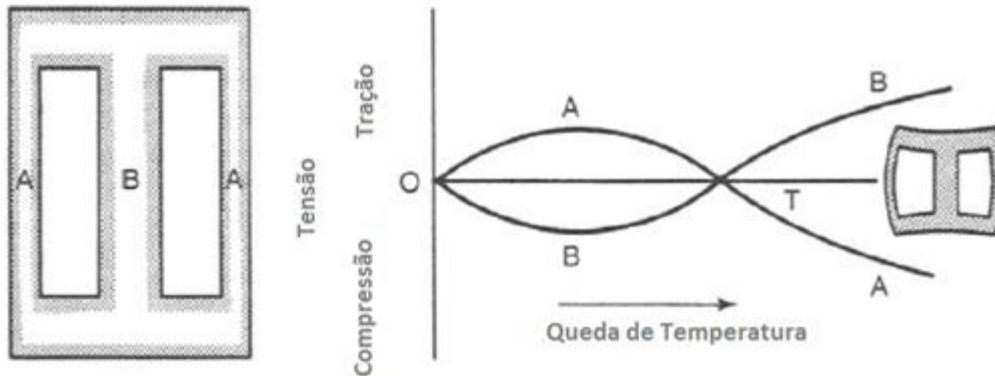
Segundo (Beeley 2001), durante o arrefecimento é possível caracterizar quatro estados relativamente às propriedades mecânicas das peças, que são:

1. Período de solidificação onde ainda existe metal líquido suficiente presente em todas as áreas, inclusive entre dentrites, de modo a compensar as contrações do material. A esta fase pode-se chamar fase Líquido-Sólido onde a resistência mecânica das peças é muito baixa mas a ductilidade é infinita.
2. Período em que a solidificação está quase completa mas ainda existem pequenas quantidades de metal líquido a atrasar o desenvolvimento de um ótima coesão na peça. Nesta fase a contração é igual à de um metal sólido, mas o metal é pouco resistente e a ductilidade quase inexistente. Pode-se chamar a esta fase Solid-Liquid ou Coherent Brittle Phase.
3. Região sólida de alta temperatura onde o metal desenvolve resistência limitada e capacidade para deformação plástica sem endurecimento.
4. Região sólida de baixa temperatura associada a uma elevada resistência mecânica e elevado comportamento elástico.



Se a resistência à contração for crítica a altas temperaturas, na fase em que o metal está quente e frágil derivado da existência de camadas líquidas ocorre fissuração a quente (*Hot Tearing*). Quando ocorre deformação plástica a baixas temperaturas, podem então aparecer fraturas, conhecidas como fissuração a frio (Beeley 2001).

Na Figura 23 pode-se observar como as tensões desenvolvidas na solidificação do metal afetam as secções de diferentes espessuras de uma peça genérica.



*Figura 23 – Desenvolvimento de tensões de tração e compressão devido às contrações no estado sólido, adaptado de (Beeley 2001)).*

A fissuração a quente é caracterizada por apresentar uma forma irregular, exibindo uma fratura completa ou parcial segundo um caminho intergranular. Poderá ocorrer este tipo de fissuração em zonas onde existe uma diferença abrupta na secção da peça, ou seja, numa zona de concentração de tensões (Beeley 2001).

Na Figura 24 pode-se ver um exemplo de fissuração a quente.



*Figura 24 – Peça com fissura devido à ocorrência de fissuração a quente (Institute of British 1961).*

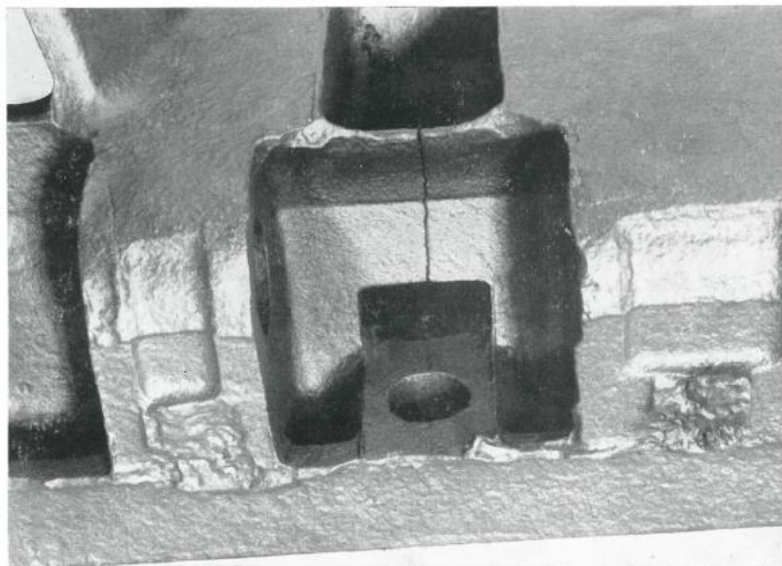


A fissuração a frio, ao contrário da fissuração a quente, é caracterizada por grandes extensões nas fissuras, lineares e direitas. Ocorre no período em que a peça já arrefeceu abaixo das temperaturas onde pode ocorrer fissuração a quente mas ainda se encontra acima da temperatura de domínio elástico onde a resistência provocada pelas pressões internas do material é acomodada por deformação plástica contínua (Beeley 2001)

Segundo (Beeley 2001) é possível relacionar as tensões desenvolvidas ( $\sigma$ ) com o módulo de Young do material (E), o coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) e a diferença de temperatura entre dois momentos diferentes ( $\Delta T$ ) através da seguinte equação:

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

Na Figura 25 pode-se ver um exemplo de uma peça com fissuração a frio.



*Figura 25 – Peça com fissura devido à ocorrência de fissuração a frio (Institute of British 1961)*

Um dos aspetos a ter em conta é o coeficiente de expansão linear do material a usar e alguns parâmetros relacionados com a contração. A magnitude da contração para alguns metais está apresentada na Tabela 3.

*Tabela 3 – Coeficiente de expansão linear, ponto de fusão e contração linear aproximada para alguns metais no estado sólido (Beeley 2001).*

<b>Metal</b>	<b>Coeficiente de Expansão Linear °C<sup>-1</sup>x10<sup>6</sup></b>	<b>Ponto de Fusão °C</b>	<b>Contração Linear Aproximada a 20°C</b>
<b>Alumínio</b>	29.2	660	1.9
<b>Cobre</b>	20.6	1083	2.2
<b>Ferro</b>	17.3	1536	2.6
<b>Chumbo</b>	31.6	327	1.0
<b>Magnésio</b>	31.4	649	2.0
<b>Níquel</b>	18.4	1453	2.6
<b>Estanho</b>	24.4	232	0.5
<b>Zinco</b>	35.9	420	1.4

## 6 - Erros Dimensionais

As dimensões de uma peça fundida são suscetíveis a variações devido à menor mudança nas condições do processo que ultrapasse os limites da prática normal de trabalho. Este tipo de defeito pode aparecer devido a falhas específicas no equipamento utilizado e no processo.

Segundo (Beeley 2001; Melo 2014), as principais causas para a ocorrência destes defeitos são:

- Falha de Alinhamento – Podem ser originadas por folgas entre as duas partes da coquilha ou entre a coquilha e o macho. Um controlo dimensional dos machos e um ajustamento da coquilha ao macho pode resolver o problema.
- Distorção da Coquilha – O empeno da coquilha e da superfície e a deformação da superfície de apartação pode originar defeitos nas peças. Um aumento da espessura das paredes da coquilha é uma solução para compensar estes empenos.

## 7 - Erros de composição e Segregação das Ligas

A maior parte dos erros de composição são provocados por falhas simples, como por exemplo o incorreto uso de cargas no forno ou de perdas seletivas de elementos da liga fundida. Estes erros podem ser evitados corrigindo a composição antes do vazamento. Todavia, o problema da segregação das ligas é um caso diferente. Segundo (Beeley 2001) podem ocorrer dois tipos de segregação, a microsegregação e a macrosegregação.

A microsegregação é uma segregação intergranular ou dendrítica e resulta da acumulação de soluto rejeitado entre os cristais formados e que falharam em difundirem-se ou juntarem-se ao restante metal líquido. As características mecânicas da peça final são muito sensíveis à microsegregação. A resistência à tração, a ductilidade e resistência à fadiga são afetadas pelas

condições intercrystalinas que diferem da matriz. A microsegregação diminui então a resistência e a ductilidade na região sólida e pode levar à fissuração a quente (Beeley 2001).

A macrosegregação pode ser provocada por vários mecanismos dependendo do modo de arrefecimento. No entanto a principal causa é a acumulação de soluto rejeitado pelo transporte em distâncias relativamente longas através da peça. No caso mais simples, normalmente chamado de segregação normal, as partes da peça moldada que solidificam em último lugar contêm altas concentrações de soluto. A segregação inversa é o termo usado para descrever o processo contrário. Devido à lenta difusão em relação às distâncias envolvidas, a extensão da macrosegregação é determinada pela turbulência e pelo fluxo convectivo devido às diferentes temperaturas e densidades de cada local (Beeley 2001).

Porém, existem mais alguns defeitos, não apresentados anteriormente, que são relevantes no processo de fundição de torneiras.

Os defeitos de fundição associados à utilização de machos fabricados em caixa quente no vazamento em coquilha são diversos, e as suas causas distintas. Os defeitos mais comuns associados aos machos são os seguintes (Dias 2008).

- Macho partido ou deslocado
- Rugosidade
- Rechupe
- Porosidade
- Inclusões de Areia

#### Macho Partido ou deslocado

É um defeito que ocorre quando existe uma incorreta colocação ou dimensionamento do macho. Este defeito é facilmente reparado através de um redimensionamento ou de uma recolocação do macho. Este defeito pode também ocorrer, devido a uma deslocação do macho, após o fecho da coquilha. Neste caso será necessário verificar as dimensões do macho e da cavidade da coquilha (Dias 2008).

Na Figura 26 é possível ver uma peça com defeito provocado por um macho que partiu durante o processo de fundição.



*Figura 26 – Peça com defeito provocado pela quebra de um macho. (Foto tirada na empresa CIFIAL)*

Na Figura 27 pode-se ver um exemplo de uma peça com defeito provocado pela deslocação do macho durante o processo de fundição.



*Figura 27 – Peça com defeito devido à deslocação do macho. (Foto tirada na empresa CIFIAL)*

É possível verificar que existe uma diferença de espessuras nas paredes internas da peça. Essas diferenças devem-se a deslocação do macho.

Na Figura 28 pode-se ver mais um exemplo de uma peça defeituosa devido à deslocação do macho.



*Figura 28 - Peça com defeito devido à deslocação do macho. (Foto tirada na empresa CIFIAL)*

Mais uma vez pode-se verificar que existe uma diferença de espessuras, desta vez entre a parede superior e a inferior. Estas diferenças de espessura devem-se também à deslocação do macho durante o processo de fundição.

### Rugosidade

Este defeito não tem origem apenas em anomalias relacionadas com o macho mas o macho pode ser uma das causas. O defeito pode ser provocado pela desagregação da areia dos machos ou pela imperfeição de pintura dos machos.

Pode-se evitar a ocorrência deste defeito utilizando machos com boa qualidade superficial, verificando a mistura da areia e controlando rigorosamente as temperaturas associadas ao processo de fabrico dos machos. A pintura correta dos machos também é um aspeto e ter em conta na eliminação deste tipo de defeito (Dias 2008).

Na Figura 29 pode-se ver um exemplo de uma peça defeituosa devido à rugosidade provocada pelo macho.



*Figura 29 – Peça com rugosidade provocada pelo macho (Dias 2008)*

### Rechupe

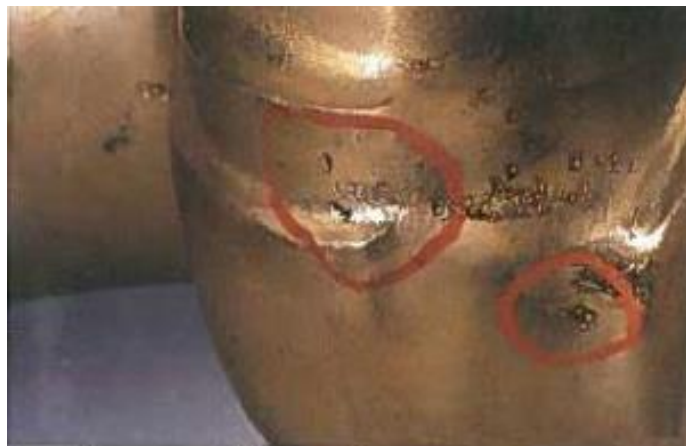
Como estudado anteriormente, o rechupe pode ter outras origens, mas os machos também podem levar ao aparecimento deste defeito. A existência de uma elevada pressão gasosa é uma das causas que se encontra relacionada com o fabrico de machos. Durante o processo de fundição, a libertação de gases dos produtos químicos usados no fabrico de machos e na pintura podem originar rechupes.

O aparecimento deste defeito pode ser prevenido verificando se a proporção de ligante usada no processo de fabrico de machos e o tipo de pintura são adequados (Dias 2008).

### Porosidade

A baixa permeabilidade dos machos, bem como, a humidade existente nas pinturas dos machos podem originar este defeito. O controlo de qualidade dos machos e da humidade das pinturas devem ser rigorosas para evitar a ocorrência deste defeito (Dias 2008).

Na Figura 30 pode-se ver um exemplo de uma peça com poros.



*Figura 30 – Peça com porosidades (Melo 2014)*

### Inclusões de Areia

Este defeito tem origem, normalmente, na libertação de areia proveniente dos machos. Um mau fabrico dos mesmos pode estar na origem deste defeito, pelo que se torna necessário melhorar as condições de fabrico, no que se refere ao controlo de porções de aditivos químicos, temperatura e tempo de cura aplicados.

O aparecimento destes defeitos pode ser motivado pela ausência de respiros nas caixas de machos, que têm como função a libertação de gases que se formam durante o fabrico dos machos (Dias 2008).

Na Figura 31 pode-se ver uma comparação entre peças corretas e peças com inclusão de areia.



*Figura 31 – À Direita: Peças corretas; À Esquerda: Peças com inclusões de areia; (Dias 2008)*

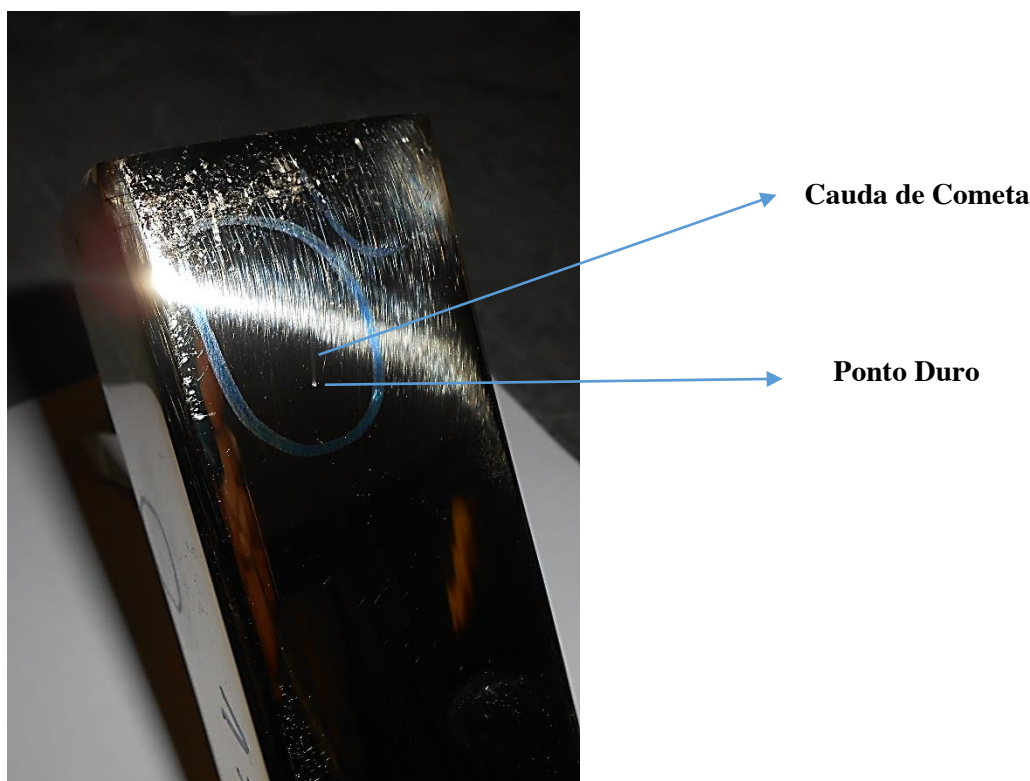
Para além de todos os defeitos acima referidos, é muito comum aparecerem pontos duros nas peças fundidas pela CIFIAL.

Os pontos duros (hard spots) numa peça fundida são zonas localizadas onde o metal tem uma dureza excessiva. Podem ocorrer em zonas de mudança de secção porque os metais para vazamento endurecem de formas diferentes para diferentes secções da peça devido a uma composição química da liga incorreta (Society 1994).

Segundo (M. Sadayappan 2004), os pontos duros são compostos intermetálicos, que possuindo dureza superior à liga mãe, produzem caudas de cometa durante o processo de polimento das peças fabricadas.

Na Figura 32 é possível ver uma peça com pontos duros e caudas de cometa.





*Figura 32 – Peça defeituosa com ponto duro e cauda de cometa (Foto tirada na empresa CIFIAL)*

No entanto, no que diz respeito às ligas de cobre e zinco, a formação de pontos duros tem sido objeto de investigação há já algum tempo. Na década de 40 iniciaram-se os estudos, baseados nos chamados bronze de manganês. Estes bronzes são endurecidos por finos e complexos precipitados, compostos por alumínio, ferro e manganês, que ficam distribuídos na matriz  $\alpha+\beta$ . No início, pensou-se que a formação dos pontos duros eram causados pela segregação e crescimento destes precipitados devido ao excesso de ferro, do processamento do banho metálico e da baixa qualidade da sucata (M. Sadayappan 2004)

Mais tarde confirmou-se que o silício também desempenha um papel fundamental na formação de pontos duros, não só no bronze de manganês mas também nos latões 60/40.

Ao analisar estes pontos duros em termos de composição química, verificou-se que contém elementos em grande quantidade de ferro, silício, cobre e alumínio. Mais tarde descobriram-se outros elementos presentes nos pontos duros, tais como o boro e o manganês.

O boro pode então formar os seus próprios pontos duros quando combinado com o ferro em baixas concentrações. Verificou-se que à medida que o teor de boro e ferro aumenta, os pontos duros crescem e tornam-se esféricos. Estas partículas são formadas bem acima da temperatura de *líquidus* (M. Sadayappan 2004)

Investigações mais recentes concluíram que a adição de ferro a uma liga de latão afinada, para concentrações superiores a 0.06 %, resultam na formação de “agulhas” intermetálicas de boreto de ferro. A adição de grandes quantidades de boro, até 0.012 %, para baixos teores de ferro (<0.055 %) não provoca a formação de pontos duros (M. Sadayappan 2004).



Relativamente à morfologia dos pontos duros, foram identificadas duas morfologias diferentes (M. Sadayappan 2004):

- Finas partículas
- Agulhas

Relativamente à microdureza, os pontos duros apresentam em média uma microdureza de 980 HK enquanto que a matriz metálica tem uma microdureza de 120 HK.

O efeito do estanho, do boro e do ferro na formação de pontos duros foi estudado e os autores concluíram que os pontos duros formam-se, nas ligas de latão estudadas, a partir de um teor de ferro de 0.05 % quando são afinadas com boro à temperatura de 980° C. Os estudos comprovaram ainda que para um teor de ferro de cerca de 0.02 %, independentemente da quantidade de boro adicionado, não é observada a formação de pontos duros (M. Sadayappan 2004).

## 2.3 Materiais Usados na Produção de Torneiras por Fundição

### 2.3.1 O Cobre

O cobre é um metal, de símbolo químico *Cu*, numero atómico 29, e possui uma cor avermelhada. O cobre, tal como a prata e o ouro é conhecido pelo homem desde a pré-história. Pode ser encontrado no estado nativo, bem como obtido casualmente através da redução de minérios. Este material gerou grande interesse antigamente devido à sua cor atraente e pela facilidade de deformação a frio (Mesquita 1978).

O nome cobre é proveniente de Cyprium (Chipre), onde os egípcios possuíam minas de cobre nativo.

Mais tarde apareceu o bronze, surgindo casualmente da fusão conjunta de minérios de cobre e estanho, o que permitiu a construção de peças mais duras e mais resistentes.

Mais recentemente surgiu o latão, que foi utilizado em larga escala pelo império Romano, em moedas, decoração, etc.

O cobre que é fornecido à indústria a partir da redução de minérios pode ser apresentado em diversas variedades, segundo teores de impurezas presentes no metal (Mesquita 1978).

As variedades de cobre são as seguintes, começando no mais impuro para o mais puro (Mesquita 1978):

- **Cobre Ordinário** – É o cobre que resulta da fusão direta do cobre em bruto. Este apresenta um teor de cobre superior a 99.6% e é muito usado para canalizações e placas de cobertura.
- **Cobre Catódico** – Obtém-se através da eletrólise do cobre bruto. O teor de cobre é superior a 99.90%, mas contém uma quantidade apreciável de hidrogénio. É fornecido em placas retangulares.

- **Cobre Desoxidado** – Proveniente da fusão de cátodos ou de cobre afinado ao fogo com um tratamento de desoxidação. É completamente livre de oxigénio e apresenta um teor de cobre superior a 99.90%. É apresentado comercialmente sob a forma de lingotes.
- **Cobre Eletrolítico** – Proveniente da fusão de cátodos, com afinação do banho antes do vazamento. O teor de cobre é superior a 99.90% mas contém vestígios de oxigénio na ordem dos 0.02% a 0.04%. Pode ser encontrado no mercado sob a forma de placas, barras e lingotes.
- **Cobre Afinado ao Fogo** – É obtido através do cobre bruto ou de cátodos impuros por afinação térmica no forno de revérbero. Pode ser encontrado em forma de lingotes, barras e placas.
- **Cobre OFHC** – Obtido através de cátodos por fusão controlada, numa atmosfera com baixos níveis de azoto e óxido de carbono, na presença de carvão de madeira de alta pureza. Resulta num cobre sem impurezas e sem inclusões de oxigénio, sendo caracterizado por uma elevada condutibilidade.

### 2.3.2 Ligas de Cobre

O cobre é ligado com outros elementos porque o cobre puro é extremamente difícil de usar na fundição pois é um material onde facilmente aparecem problemas de porosidade, fissuração à superfície e criação de cavidades internas. As características de fundição do cobre podem ser melhoradas através da adição de pequenas quantidades de certos elementos como o berílio, silício, níquel, zinco, crómio e prata. Durante a fundição com ligas de cobre é necessário usar uma temperatura de vazamento o mais baixo possível para que a turbulência do escoamento durante o vazamento seja mínima.

As ligas de cobre em fundição devem ser utilizadas quando fatores como a resistência à corrosão, compressão e tração e resistência ao desgaste querem ser associadas a uma boa aparência, boa maquinabilidade e elevada condutividade térmica e elétrica.

Podem ser usadas em vários tipos de fundição como a fundição em areia, em coquilha (no caso das torneiras, por exemplo), moldação permanente e por centrifugação (International 1998).

Segundo (International 1998), as ligas de cobre dividem-se em três grupos de acordo com o intervalo de solidificação que são os seguintes:

- **Grupo I** – ligas com um intervalo de solidificação pequeno, menos que 50° C entre a fase líquida e a fase sólida;
- **Grupo II** – ligas com um intervalo de solidificação intermédio, entre 50 e 100° C entre a fase líquida e sólida;
- **Grupo III** – ligas com um grande intervalo de solidificação, superior a 170° C;

Existem muitas ligas de cobre, onde o cobre é ligado com uma grande variedade de elementos. Como já referido anteriormente, a adição destes elementos até um teor de 1% confere ao cobre melhores propriedades mecânicas, sem alterar as características térmicas e elétricas (Mesquita 1978).

As mais importantes ligas de cobre são as seguintes (Mesquita 1978; Society 1984):

- Cobre – Zinco (Latões)
- Cobre – Estanho (Bronzes)
- Cobre – Berílio
- Cobre – Cádmio
- Cobre – Silício
- Cobre – Arsénio
- Cobre – Crómio
- Cobre – Prata
- Cobre – Telúrio
- Cobre – Zircónio

Com teores superiores a 1%, de outros elementos, existem imensas ligas de cobre, algumas formadas por apenas dois elementos (cobre e outro), também conhecidas por ligas binárias e outras formadas por três ou mais elementos, conhecidas por ligas ternárias, quaternárias, etc.

De todas as ligas de cobre, as mais importantes e mais usadas são os latões (ligas de cobre e zinco) e os bronzes (ligas de cobre e estanho). Os bronzes conferem ótimas qualidades de resistência ao desgaste e atrito enquanto que os latões oferecem muito boa resistência à corrosão (Mesquita 1978).

Genericamente, as propriedades físicas e mecânicas comuns nas ligas de cobre são as seguintes (AFS 2014; NFFS 1994):

- Boa resistência à corrosão, contribuindo para uma grande durabilidade, logo contribuindo também para uma redução dos custos;
- Propriedades mecânicas favoráveis derivado do cobre puro, que é macio e dúctil;
- Boa condutividade elétrica e térmica, sendo melhor do que qualquer outro material exceto a prata. Porém, estas propriedades podem ser reduzidas em certas ligas;
- Baixo coeficiente de fricção e desgaste, como por exemplo as ligas “High Leaded Tin-Bronzes”, que são usadas em rolamentos e possuem, em alguns casos, coeficientes de desgaste menores que o aço;
- Boas qualidades de fundição. Praticamente todas as ligas de cobre podem ser usadas em fundição em areia, por centrifugação, moldações permanentes e coquilha;
- Facilidade de processamento após a fundição por maquinagem, lixagem e polimento.
- Grande aptidão para receber revestimentos de acabamento como por exemplo a niquelagem e a cromagem.
- Boas superfícies finais e um grande controlo dimensional são facilmente obtidas;
- Grande variedade de escolha dentro das ligas de cobre;
- Custos reduzidos comparando com outros materiais devido aos baixos custos de maquinagem.

### 2.3.3 Latões

Os latões são ligas compostas por cobre e zinco, podendo ser adicionados ou não outros elementos como ferro, alumínio, níquel e silício. Os latões são divididos em basicamente quatro famílias.

- Ligas de cobre, estanho e zinco (latões vermelhos, semi-vermelhos e amarelos).
- Latões amarelos de alta resistência.
- Latões amarelos de alta resistência com chumbo.
- Ligas de cobre, zinco e silício.

As ligas de cobre e zinco são ligas em que os átomos, quer do cobre, quer do zinco se podem substituir um ao outro dentro da mesma estrutura cristalina (Society 1984).

O diagrama de fases de uma liga composta por cobre e zinco pode ser vista na Figura 33.

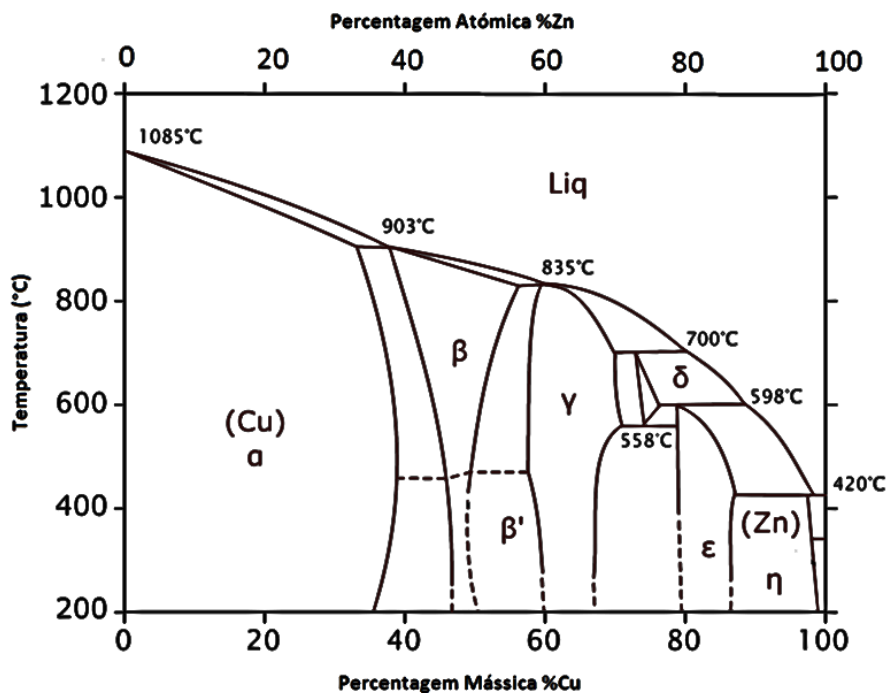


Figura 33 – Diagrama de fases da liga de Cobre-Zinco, adaptado de (American Society 1961)

O diagrama de fases permite prever o comportamento das ligas em várias situações, aferir a capacidade de realização de tratamentos térmicos, definir a solubilidade, extrair informações relevantes ao ponto de fusão e obter dados interessantes relativamente à fundição dessa liga. Uma liga metálica, em equilíbrio a uma dada temperatura e pressão, pode ser constituída por uma fase ou por uma mistura de fases, variando consoante a composição da liga. As fases presentes podem ser variadas alterando a temperatura, a pressão ou a composição (Oliveira 2004).

As fases presentes do diagrama de fases da liga de cobre e zinco são as seguintes (International 1998; Melo 2014; Society 1984):

Fase	Cobre (%)	Zinco (%)	Descrição
$\alpha$	> 65	<35	Solução sólida de zinco no cobre, com estrutura cristalográfica CFC, com valor máximo de zinco de 39% a 454 <sup>o</sup> C, baixando até 32.5% à temperatura peritética de 902 <sup>o</sup> C e até 33% a 150 <sup>o</sup> C. Ligas dúcteis e maleáveis e pouco duras. A cor varia de vermelho a amarelo (20% Zn) até amarelo polido com verde (30% Zn). Indicadas para trabalho mecânico a frio.
$\alpha+\beta$	55 - 65	35 – 45	Ligas Bifásicas ou Duplex, com estrutura cristalina CCC, com uma percentagem elevada de zinco permitindo assim um baixo custo quando comparado com o cobre puro, e a presença da fase $\beta$ que melhora as propriedades de vazamento e reduz a suscetibilidade à fissuração a quente.
$\beta$	50 - 55	45 – 50	Composto intermetálico de Cobre e Zinco com estrutura cristalina CCC. Ordenada abaixo de 460 <sup>o</sup> C e desordenada acima desta temperatura. É uma fase frágil e pouco dúctil e dura abaixo dos 600 <sup>o</sup> C.
$\gamma$	<50	>50	Fase frágil e dura, não sendo muito utilizada, ocorrendo apenas em ligas com elevadas percentagens de zinco.

Como já referido anteriormente podem ser adicionados outros elementos aos latões e ligas de cobre com o objetivo de melhorar as suas propriedades mecânicas. Os elementos e efeitos da sua adição são os seguintes (Castro 2008):

- **Ferro** – melhora a generalidade das propriedades mecânicas, principalmente a ductilidade e a resistência a tração pois promove o refinamento do grão da liga. Também melhora levemente a vazabilidade dos latões. Porém é necessário cuidado no uso do ferro nos latões pois em grandes quantidades pode originar a formação de defeitos.
- **Alumínio** – Tem como principal objetivo desoxidar durante a fundição, melhorar a fluidez do metal fundido e reduzir as perdas de zinco devido a volatilização. É usado para melhorar a resistência à corrosão do latão. O alumínio é também um elemento muito betagénico, estabilizador da fase  $\beta$ . Aumenta bastante a resistência mecânica dos latões.
- **Estanho** – Melhora a resistência à corrosão dos latões e também a resistência à dezincificação. Melhora também levemente as propriedades mecânicas dos latões mas, quando em excesso, pode provocar fissuração a quente durante o arrefecimento das peças. O teor de estanho não deve superar os 0.3%.
- **Níquel** – É um elemento que melhora a resistência à corrosão dos latões mas é muito caro, logo o seu uso não é muito comum. Este elemento combinado com o alumínio gera Aluminetos de Níquel, o que aumenta a dureza da liga, porém diminui a maquinabilidade desta.
- **Arsénio** – Quando aplicado em baixa quantidade, o arsénio funciona como antidezincificante pois melhora a resistência à corrosão devido à dezincificação do latão.

O uso excessivo, acima dos 0.2% provoca a deterioração das propriedades mecânicas do latão.

- **Manganês** – Melhora bastante a resistência mecânica dos latões, reduz o ponto de fusão e ajuda na desoxidação durante a fase de fusão. Para teores superiores a 1% torna o latão demasiado duro e difícil de maquinar.
- **Silício** – Este elemento é muito semelhante ao alumínio considerando as alterações que gera quando aplicado nos latões. Porém, tem tendência para formar pontos duros e isso não é desejável. Portanto o teor de silício não deverá ser superior a 0.05%.
- **Magnésio** – É muito útil na desoxidação do latão e torna a sua cor mais clara. Porém, o seu ponto de ebulição é muito baixo, logo não é possível mantê-lo no banho de metal durante muito tempo, logo só deve ser adicionado pouco antes do vazamento.
- **Bismuto** – Este elemento reduz levemente a condutividade do cobre, podendo este efeito ser controlado pela adição de Lítio. Hoje em dia é usado como substituto do chumbo pois não é prejudicial para a saúde e para o ambiente. Mais à frente será abordado em maior detalhe o efeito deste elemento nos latões.
- **Chumbo** – Tem um importante efeito nos processos de maquinagem após a fundição pois é um elemento insolúvel nos latões a baixa temperatura (0.04% a 800° C) e distribui-se na microestrutura em forma de glóbulos. A distribuição de chumbo não é uniforme porque se deposita nas juntas de grão devido à segregação. Isto ajuda nas operações de maquinagem pois o chumbo atua como lubrificante entre a peça e a ferramenta. Mais à frente será também abordado com maior profundidade o papel do chumbo nos latões.
- **Zinco** – Diminui a resistência à corrosão nos latões bifásicos sendo influenciado pela distribuição deste na microestrutura e a sua quantidade (Society 1984).

Tendo em conta que todos os elementos acima referidos podem ser adicionados às ligas de cobre e zinco foram criadas duas fórmulas que têm como função definir as características dos elementos de liga presentes em função destes. Essas fórmulas são as seguintes (Castro 2008; Melo 2014):

- Equivalente de Zinco

$$\%ZnEq = \%Zn + 10 \times \%Si + 6 \times \%Al + 2 \times \%Sn + \%Pb + 0.9\%Fe + 0.5\%n - 1.2\%Ni$$

O Equivalente de Zinco de um elemento pode ser definido como a influência do elemento adicionado nas fases  $\alpha$  ou  $\beta$  comparando com a quantidade de Zinco necessária para provocar as mesmas alterações.

- Título Fictício em Cobre

$$TF (Cu) = (100 \times \%Cu) / (\%ZnEq + 2 \times \%Mg)$$

O título fictício em cobre é muito utilizado na caracterização das ligas de latão em função da composição química desta. Quanto maior for o TF (Cu) mais dúctil é a liga, quanto menor for o TF (Cu) mais frágil é a liga. Estas relações podem ser vistas na Figura 34.

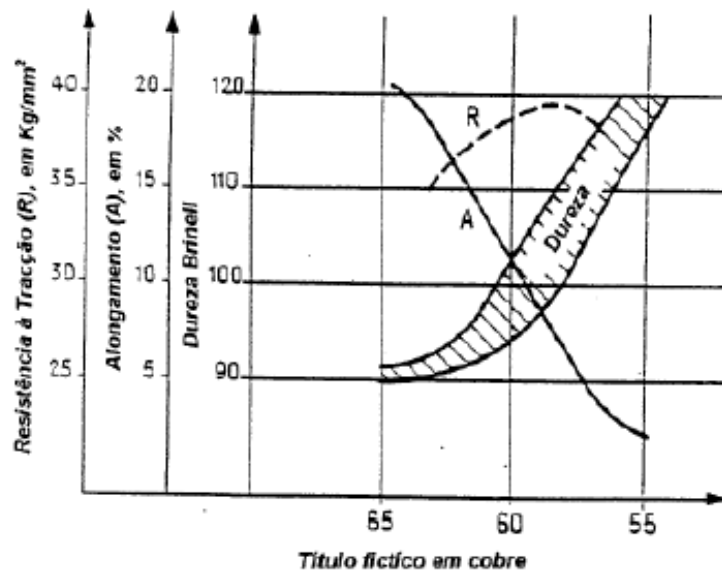


Figura 34 – Variação das propriedades mecânicas dos latões quando vazados em coquilha em função do título fictício de cobre (Melo 2014)

Para um latão a ser usado em fundição em coquilha, o título fictício deverá estar entre 58 e 61% sendo que o valor ideal é de 60% (Melo 2014).

A escolha dos latões para o fabrico de torneiras deve-se principalmente aos seguintes fatores (Oliveira 2004; García et al. 2010; Nobel et al. 2014):

- Aptidão à deformação plástica a quente e a frio;
- Boa maquinabilidade;
- Elevada resistência à corrosão;
- Facilidade de moldação;
- Excelente condutividade térmica;
- Boa resistência à fadiga;
- Aptidão à niquelagem e à cromagem;

### 2.3.3.1 Latões com Chumbo

Como já foi referido anteriormente, os latões são muito usados na indústria de fundição de metal devido às suas excelentes propriedades combinadas com o baixo custo.

Para as latões manterem as suas boas propriedades e continuar a ser viável o seu uso na fundição, certos elementos são adicionados, sendo um deles o chumbo.

O chumbo melhora em muito a maquinabilidade da liga pois funciona como um lubrificante facilitando o arranque de apra.

Esta propriedade deve-se à formação de glóbulos discretos que são conservados enquanto o metal solidifica. Estes estão dispersos uniformemente na matriz da liga atuando como um lubrificante durante a maquinagem. Estes glóbulos enchem os espaços interdendríticos durante a solidificação prevenindo assim a formação de microrechupes. Isto resulta também numa grande impermeabilidade da liga quando está sobre pressão (AFS 2014).

O chumbo é praticamente insolúvel no cobre pois como o seu ponto de fusão é muito baixo, este tende a migrar para as fronteiras de grão durante a solidificação.

Na Tabela 4 podemos ver a composição de três tipos de latão (Red Brass, Semi-Red Brass e Yellow Brass). As ligas estão apresentadas segundo a designação UNS (*Unified Numbering System for Metals and Alloys*) (CES Edupack 2015).

*Tabela 4 – Composição química dos latões C83600, C8400 e C85800 (Society 1984)*

Liga	Red Brass (C83600)	Semi-Red Brass (C84400)	Yellow Brass (C85800)
<b>Cobre</b>	84.0 – 86.0	78.0 – 82.0	57.0
<b>Estanho</b>	4.0 – 6.0	2.3 – 3.5	1.5
<b>Chumbo</b>	4.0 – 6.0	6.0 – 8.0	1.5
<b>Zinco</b>	4.0 – 6.0	7.0 – 10.0	31.0 – 41.0
<b>Ferro</b>	0.30	0.40	0.50
<b>Antimónio</b>	0.25	0.25	0.05
<b>Níquel (com Cobalto)</b>	1.0	1.0	0.50
<b>Manganês</b>	-	-	0.25
<b>Arsénio</b>	-	-	0.05
<b>Enxofre</b>	0.08	0.08	0.05
<b>Fósforo</b>	0.05	0.02	0.01
<b>Alumínio</b>	0.005	0.005	0.55
<b>Sílica</b>	0.005	0.005	0.25



Para os latões acima apresentados, as características estão apresentadas na Tabela 5.

*Tabela 5 – Características dos latões C83600, C84400 e C85800 (AFS 2014; SeBiLOY Sem data)*

<b>Liga</b>	<b>Red Brass (C83600)</b>	<b>Semi-Red Brass (C84400)</b>	<b>Yellow Brass (C85800)</b>
<b>Temperatura de Fusão (<i>Liquidus</i>) (°C)</b>	1010	1004	899
<b>Intervalo de Solidificação (°C)</b>	156	161	28
<b>Fluidez (cm a 56° C )</b>	24	30	Médio
<b>Resistência a fissuração a quente</b>	15-21	23-24	Médio
<b>Escorificação</b>	Baixa	Média	Média
<b>Soldadura</b>	Excelente	Excelente	Bom
<b>Brasagem</b>	Bom	Bom	Bom
<b>Efeitos da Secção nas Propriedades Mecânicas</b>	Grande	Grandes	Médios

A maquinabilidade é uma medida relativa da facilidade com que um material pode ser maquinado quando comparado com um material padrão.

A classificação de maquinagem tem em conta a vida normal da ferramenta, acabamento de superfície e velocidade de corte. Estes fatores são combinados de forma a chegar a uma classificação final de maquinagem (Schneider 2009).

Neste caso o material padrão usado, ou seja, cuja classificação de maquinagem é 100, é o latão C36000 (Free-Cutting Brass) (SeBiLOY Sem data).

A composição química do latão C3600 está apresentada na Tabela 6.

*Tabela 6 – Composição química do latão C36000 (Free Cutting Brass)(Metals 2015).*

<b>Composição química do latão C3600 (min/max)</b>	
<b>Cu</b>	60.0 – 63.0 %
<b>Fe</b>	0.5 %
<b>Pb</b>	2.5 – 3.7 %
<b>Zn</b>	Restante

Relativamente à maquinagem, a classificação para estes latões é a seguinte:

*Tabela 7 – Classificação de maquinagem dos latões C83600, C84400 e C85800 (AFS 2014)*

Liga	Classificação de Maquinagem (Várias operações)
<b>C83600</b>	84
<b>C84400</b>	90
<b>C85800</b>	80

Apesar do uso de chumbo nos latões trazer muitas vantagens, o seu uso é prejudicial para a saúde e para o ambiente, principalmente quando usado em canalizações. Respirar ou ingerir partículas e pós de chumbo pode ser muito prejudicial para a saúde se em grandes quantidades. Visto que as canalizações são um dos meios de consumo de água em todo o mundo, o uso de chumbo nestas pode ser perigoso.

Em 1996, foi formulada a emenda para a “*Safe Drinking Water Act*”, que limitou a quantidade de chumbo na água potável, e então, surgiu a necessidade de substituir o chumbo usado nos latões para fundição de componentes para canalizações por outros elementos.

O “*Safe Drinking Water Act*”, que controla a qualidade de água potável foi estabelecido em 1974 de forma a minimizar os químicos e as bactérias presentes na água. A emenda de 1996 incluiu um regulamento para todas as peças de canalização relativamente ao uso de chumbo nestas. Todas as torneiras, fontes, sistemas de refrigeração e todos os outros dispositivos usados para beber água devem estar de acordo com a norma 61 da (NSF) National Sanitation Foundation (AFS 2014).

A norma obriga à certificação dos dispositivos, não das ligas, porque dispositivos construídos pela mesma liga poderão conter diferentes quantidades de chumbo, dependendo das diferenças na área de superfície exposta à água. Porém, o limite de 11 partes por milhão de chumbo referido na norma NSF 61 é menor que o limite de 15 partes por milhão das EPA’s *Lead and Copper Rule*, que é o nível que os recursos públicos de fornecimento de água devem cumprir. Essa discrepância deve-se ao facto da EPA assumir que 4 partes por milhão poderão aparecer de outras fontes que não as canalizações (AFS 2014).

Por isso, foi necessário substituir o chumbo por outros elementos e surgiram então os latões sem chumbo.

### 2.3.3.2 Latões sem Chumbo

Tendo em conta as leis que obrigaram à redução do uso de chumbo devido ao seu perigo para a saúde e para o ambiente foi necessário pensar em utilizar ligas sem chumbo no fabrico de torneiras. Para que esta mudança fosse bem sucedida era necessário garantir que estas novas ligas tenham propriedades mecânicas e de fundição que permitam o seu uso para a fundição de torneira (Nobel et al. 2014).

Algumas empresas dedicaram-se a desenvolver latões sem chumbo.

A ideia de usar uma combinação de bismuto e selénio para substituir o chumbo foi originalmente concebida pela ASARCO Technical Center, Salt Lake, Utah. Estes desenvolvimentos foram, durante muitos anos, seguidos por um consórcio industrial incluindo a Copper Development Association Inc (CDA), American Foundrymen's Society (AFS), a Brass and Bronze Ingots Manufacturers (BBIM), o Materials Technology Laboratory of CANMET, outras fundições e produtores de produtos para água. Esta pesquisa mostrou que a combinação de bismuto e selénio oferece os mesmos efeitos benéficos na maquinabilidade das peças vazadas que o chumbo oferecia. A estanquidade e outras propriedades de fundição dos latões de selénio/bismuto são também idênticas às ligas de cobre convencionais que usam chumbo (SeBiLOY Sem data).

Várias empresas desenvolveram ligas sem chumbo, havendo variedade e possibilidade de escolha. Abaixo são apresentadas algumas dessas ligas.

- **ENVIROBRASS (SeBiLOY)**

A SeBiLOY fornece 3 ligas distintas:

- EnviroBrass I (C89510);
- EnviroBrass II (C89520);
- EnviroBrass III (C89550);

Na Tabela 8 pode-se ver a composição das ligas EnviroBrass I, EnviroBrass II e EnviroBrass III.

Tabela 8 – Composição química das ligas EnviroBrass I, EnviroBrass II e EnviroBrass III (SeBiLOY)

Composição das ligas EnviroBrass I, EnviroBrass II e EnviroBrass III			
Elementos	Intervalo ou Máximo, %		
	EnviroBrass I (C89510)	EnviroBrass II (C89520)	EnviroBrass III (C89550)
<b>Cobre</b>	86-88%	85-87%	58-64%
<b>Estanho</b>	4-6%	5-6%	1.2%
<b>Chumbo</b>	0.25%	0.25%	0.1%
<b>Zinco</b>	4-6%	4-6%	32-38%
<b>Bismuto</b>	0.5-1.5%	1.5-2.2%	0.6-1.2%
<b>Selênio</b>	0.35-0.75%	0.8-1.1%	0.01-0.1%
<b>Níquel (com Cobalto)</b>	1%	1%	1%
<b>Ferro</b>	0.2%	0.2%	0.5%
<b>Antimônio</b>	0.25%	0.25%	0.05%
<b>Enxofre</b>	0.08%	0.08%	0.05%
<b>Fósforo</b>	0.05%	0.05%	0.01%
<b>Alumínio</b>	0.005%	0.005%	0.1-0.6%
<b>Silício</b>	0.005%	0.005%	0.25%

As ligas EnviroBrass I e EnviroBrass II contém, no máximo, 0.25% de chumbo enquanto que a liga EnviroBrass III apenas contém 0.1% de chumbo, não contabilizando a quantidade de chumbo que poderá estar presente nos materiais reciclados de onde as ligas de fundição são normalmente feitas. Porém, até para o nível máximo de chumbo permitido por lei, a quantidade de chumbo presente nas ligas apresentadas é baixo o suficiente para cumprir as exigências da NSF Standard 61 para a maiorias das peças para canalizações (SeBiLOY Sem data).

Como referido atrás, as propriedades mecânicas e de vazamento das ligas usadas são muito importantes. Não tendo isto em conta, as peças finais podem ficar com defeitos, o que é indesejável.

As propriedades mecânicas das ligas EnviroBrass são muito equivalentes às propriedades mecânicas dos latões com chumbo. Especificamente as ligas EnviroBrass I e EnviroBrass II dispõem de propriedades mecânicas, incluindo a dureza, muito semelhantes aos latões vermelhos com chumbo, porém, com menor ductilidade. A liga EnviroBrass III possui uma ductilidade um pouco menor que os latões amarelos mas todas as outras propriedades mecânicas são muito

semelhantes. Com o aumento do zinco e do bismuto presentes na liga, a resistência aumenta enquanto a ductilidade baixa. Isto significa que as peças feitas em latões com chumbo não precisam de ser radicalmente modificadas para serem fundidas com estas ligas (SeBiLOY Sem data).

As propriedades mecânicas destas ligas podem ser comparadas com os latões com chumbo convencionais na Tabela 9.

*Tabela 9 – Comparação das propriedades mecânicas das ligas EnviroBrass I, EnviroBrass II e EnviroBrass III com outros latões (SeBiLOY Sem data; CES Edupack 2015)*

<b>Propriedades Mecânicas Típicas e Mínimas das Ligas EnviroBrass</b>				
<b>Liga</b>	<b>Tensão de Rotura (MPa)</b>	<b>Tensão Limite Elástico (MPa)</b>	<b>Ductilidade</b>	<b>Dureza [(500 kg) BHN]</b>
<b>C36000 (Free Cutting Brass)</b>	360 – 400	150 – 160	36 – 40	75 – 80
<b>Latão Vermelho C83600 (Típico) *</b>	255	117	30	60
<b>Latão Semi-Vermelho C84400 (Típico) *</b>	241	47	28	55
<b>EnviroBrass I (Típico) *</b>	209	136	12	71
<b>EnviroBrass I (Mínimo) *</b>	185	119	8	66
<b>EnviroBrass II (Típico) *</b>	215	145	10	73
<b>EnviroBrass II (Mínimo) *</b>	176	121	6	68
<b>Latão Amarelo C85800 (Típico) **</b>	332	192	9	60
<b>EnviroBrass III (Típico) **</b>	332	200	8	63
<b>EnviroBrass III (Mínimo) **</b>	240	140	5	60

\*Fundição em Moldes de Areia \*\*Fundição em Moldação Permanente

Uma das propriedades mais importantes numa liga para fundição é a maquinabilidade pois, normalmente após serem vazadas, as peças necessitam de acabamento, principalmente no caso de torneiras onde o aspeto exterior é muito importante. Por isso, usualmente todas peças para canalizações vazadas são maquinadas, e a maquinagem aumenta o custo de produção. É importante que essas peças sejam facilmente maquináveis para poupar em tempo de maquinagem e em material. Os latões com chumbo tradicionais têm muito boas propriedades de maquinagem,

sendo que a maquinagem destes nem sempre necessita do uso de fluidos de corte (SeBiLOY Sem data).

Na Tabela 10 é possível ver a classificação de maquinagem das ligas EnviroBrass tendo como ponto de comparação a liga C36000, que é a liga padrão, contendo uma classificação de maquinagem de 100, baseado nos requisitos de carga no fuso da máquina para várias operações de maquinagem.

*Tabela 10 – Comparação da classificação de maquinagem das ligas EnviroBrass com outros latões (SeBiLOY Sem data)*

<b>Liga</b>	<b>Classificação de Maquinagem (Várias operações)</b>
<b>C36000 (Free-Cutting Brass)</b>	100
<b>C83600</b>	84
<b>C84400</b>	90
<b>EnviroBrass I</b>	75
<b>EnviroBrass II</b>	85
<b>C85800</b>	80
<b>EnviroBrass III * (Com 0.7% Bi)</b>	75
<b>EnviroBrass III * (Com 1.1% Bi)</b>	97

\*Fundição em Moldações Permanentes

Os latões para fundição também devem possuir boas características de fundição para reduzir a probabilidade de aparecer defeitos nas peças finais. As características de fundição das ligas EnviroBrass comparadas com os latões convencionais podem ser consultadas nas Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Comparação das características de fundição das ligas EnviroBrass com outros latões (SeBiLOY Sem data)

Liga	Temperatura de Fusão (°C)	Intervalo de Solidificação (°C)	Fluidez (cm at 56° C )
<b>C83600</b>	1010	156	24
<b>C84400</b>	1004	161	30
<b>EnviroBrass I C89510</b>	1021	206	24
<b>EnviroBrass II C89520</b>	1005	196	25
<b>C85800</b>	899	28	Médio
<b>EnviroBrass III C89550</b>	892	32	Médio

Tabela 12 - Comparação das características de processamento das ligas EnviroBrass com outros latões (SeBiLOY Sem data)

Liga	Formação de Escória (Drossing)	Soldadura	Brasagem	Efeitos do Tamanho da Secção nas Propriedades Mecânicas
<b>C83600</b>	Baixa	Excelente	Bom	Grandes
<b>C84400</b>	Média	Excelente	Bom	Grandes
<b>EnviroBrass I C89510</b>	Baixa	Excelente	Bom	Pequenos
<b>EnviroBrass II C89520</b>	Baixa	Excelente	Bom	Pequenos
<b>C85800</b>	Média	Bom	Bom	Médios
<b>EnviroBrass III C89550</b>	Média	Bom	Bom	Médios

- **ECOBASS (Mitsubishi Shindoh Co, Ltd)**

O latão ECO BRASS é um latão sem chumbo desenvolvido pela empresa Mitsubishi Shindoh Co. Ltd. O ECO BRASS pode ser usado em várias peças e dispositivos, como por exemplo, válvulas, torneiras e peças de precisão. Pode ser usado como substituto para o aço inoxidável em veios, parafusos e rolamentos. Pode também ser usado em peças para automóveis e eletrónica.

É uma liga com excelente maquinabilidade, forjabilidade e uma resistência equivalente ao aço inoxidável. Possui uma boa fluidez e boa vazabilidade fazendo com que seja adequado para fundição.

O ECO BRASS pode ser fornecido em várias formas seja em varão, forjado ou para fundição.

Relativamente à vertente ecológica o ECO BRASS, é como quase todas as ligas sem chumbo, uma liga amiga do ambiente. Porém, ao contrário do ENVIROBRASS, nesta liga não é adicionado bismuto para substituir o chumbo mas sim silício, que também não é prejudicial para a saúde e existe em grande quantidade (Shindoh 2015).

A composição química da liga ECO BRASS é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição química da liga ECOBRASS (Shindoh 2015)

Liga	Composição Química (%)					
	Cu	Si	Pb	Sn	Fe	Zn
<b>ECO BRASS</b>	75.5	3.0	0.1 max	-	-	Rem

As características do ECO BRASS são (Shindoh 2015).

- Alta resistência – A resistência do ECOBRASS é cerca de 1.4 vezes melhor que a da liga C3604 e equivalente à liga C6782 e ao aço inoxidável SUS304. Na Figura 35 pode-se analisar o referido.

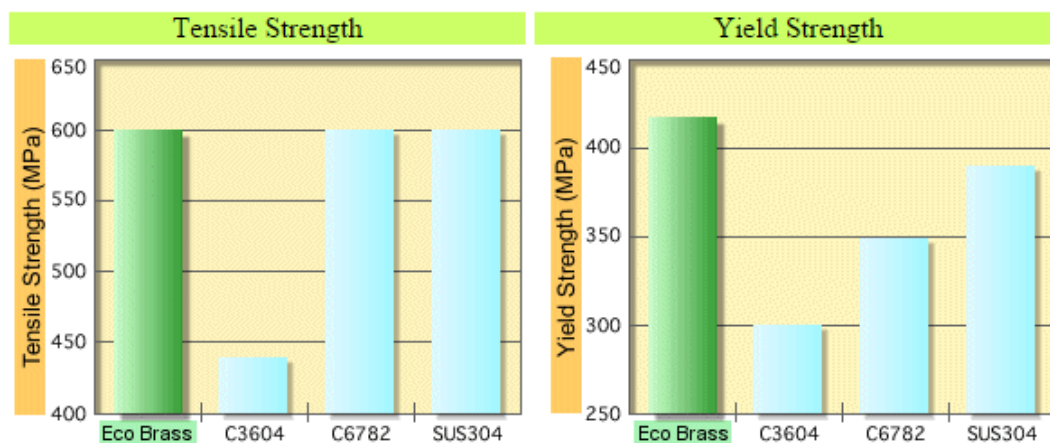


Figura 35 – Comparação da Resistência à Tração e da Tensão Limite Elástica da liga ECO BRASS com as ligas C3604, C36782 e SUS304 (Shindoh 2015)

- Excelente resistência à corrosão por dezincificação – O ECO BRASS tem uma boa resistência à dezincificação após forjamento ou vazamento, sem a necessidade de usar tratamentos térmicos. Na Figura 36 pode-se analisar o referido.



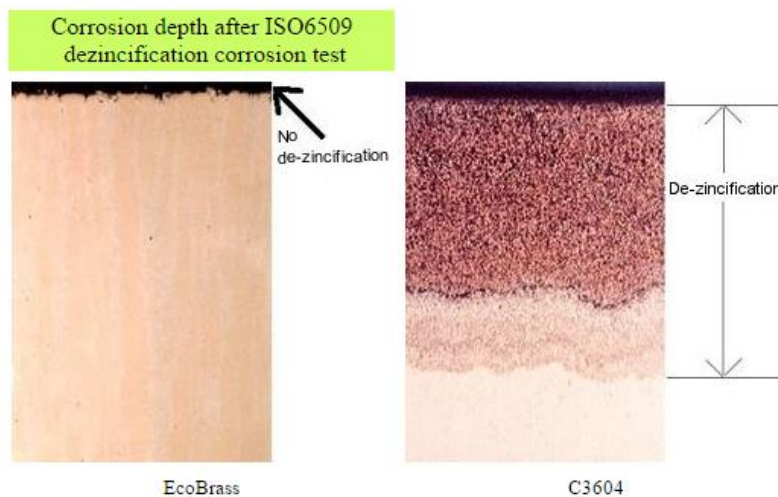


Figura 36 – Comparação da resistência à corrosão por dezincificação entre a liga ECO BRASS e a liga C3604 (Shindoh 2015)

- Excelente resistência à corrosão sob tensão que provoca fissuração – Este era um grande problema dos latões convencionais. O ECO BRASS, que contém 21% de zinco, valor muito menor que o usado nos latões tradicionais, combinado com os 3% de silício que é adicionado diminui a probabilidade de ocorrer fissuração sob tensão. Na Figura 37 pode-se ver uma comparação deste parâmetro entre 3 ligas diferentes.

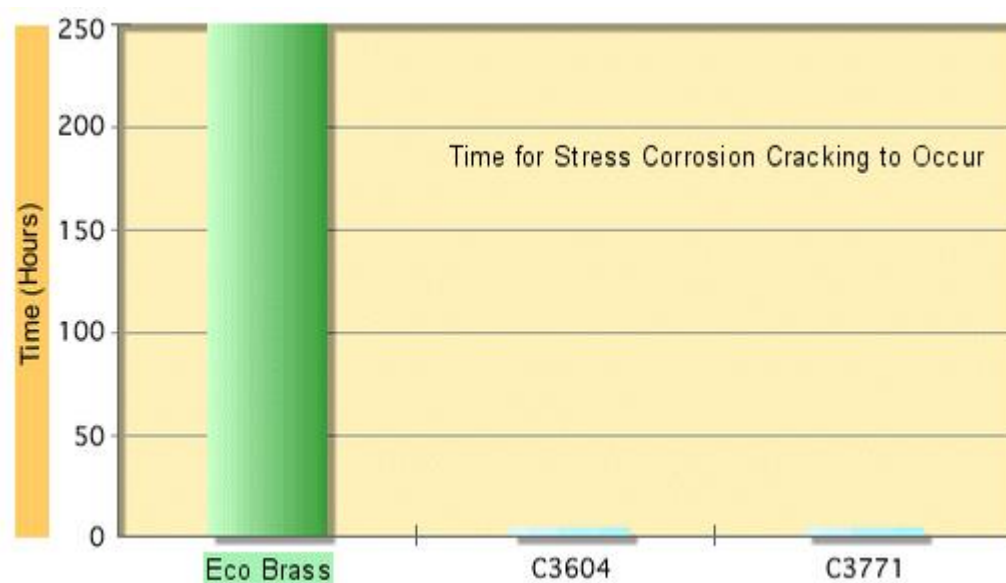


Figura 37 – Comparação da resistência à corrosão sob tensão entre a liga ECO BRASS e as ligas C3604 e C3771 (Shindoh 2015)

Relativamente aos processos de fabrico usando a liga ECO BRASS, as características são as seguintes:

- Boa maquinabilidade – A microestrutura do latão ECO BRASS consiste numa fase  $\kappa$  rica em silício ( $\text{Cu}_8\text{Zn}_2\text{Si}$ ) e uma fase  $\gamma$  ( $\text{Cu}_4\text{ZnSi}$ ). As fases  $\alpha$ ,  $\kappa$  e  $\gamma$  são formadas pela adição de silício, facilitando o arranque de aparas, fazendo com que este latão possua boas qualidades de maquinagem. Na Figura 38 ver a microestrutura do ECO BRASS.

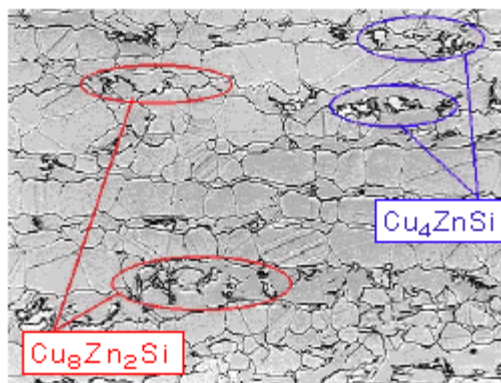


Figura 38 – Microestrutura da liga ECO BRASS (Shindoh 2015)

- Boas propriedades de fundição – o ponto de fusão da liga ECO BRASS é  $130^{\circ}\text{C}$ , mais baixo que a liga C83600 e a fluidez do ECO BRASS é melhor também o que torna este latão muito bom para o uso em fundição.
- **DIEHL 430 PbF**

Apesar de a maior parte das torneiras serem produzidas através de fundição, algumas delas podem ser produzidas apenas através de maquinagem.

O latão sem chumbo Diehl 430 PbF é um latão especial com características mecânicas únicas e uma boa alternativa aos latões tradicionais para maquinagem. Este latão possui uma alta resistência à tração combinado com uma alta ductilidade, características que podem ser comparadas com alguns aços. Este latão apresenta excelentes propriedades de maquinagem e boas propriedades de conformação a quente e frio.

O latão Diehl 430 PbF possui uma maior resistência à corrosão quando comparado com os latões convencionais. Este latão é também muito resistente a dezincificação.

É usado em diversas aplicações como em equipamentos eletrónicos, automóveis, equipamentos sanitários e em aquecimento (Messing 2005).

Como é um latão sem chumbo cumpre as normas impostas pelos Estados Unidos da América que limita o uso de chumbo. A composição química do latão Diehl 430 PbF é a apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição química do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005)

Composição química do latão Diehl 430 PbF	
<b>Cu</b>	76%
<b>Si</b>	3%
<b>P</b>	0.05%
<b>Zn</b>	Rem.

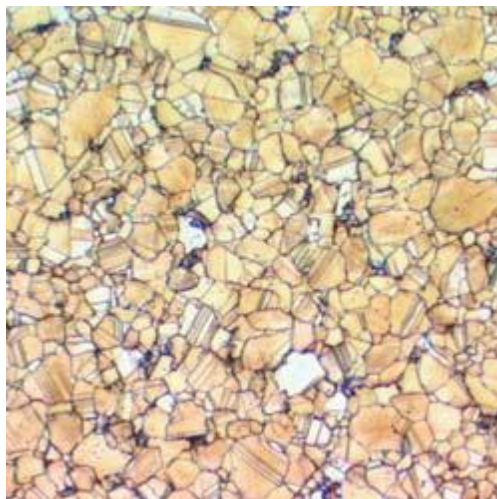
Algumas propriedades físicas apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Propriedades do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005)

<b>Densidade</b>	8.3 g/cm <sup>3</sup>
<b>Condutividade Elétrica</b>	5.3 m/mm <sup>2</sup>
<b>Condutividade Térmica</b>	Ca. 40 W/mK
<b>Módulo de Elasticidade</b>	106 kN/mm <sup>2</sup>
<b>Tensão de Ruptura</b>	700 MPa
<b>Tensão Limite Elástico 0.2 %</b>	480 MPa
<b>Ductilidade</b>	23 %
<b>Dureza HB</b>	180 Brinell

(valores de referência para um varão de 20mm de diâmetro)

A microestrutura do latão é apresentada na Figura 39.



*Figura 39 – Microestrutura do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005)*

O latão Diehl 430 PbF apresenta uma microestrutura que consiste nas fases  $\alpha$ ,  $k$  e  $\gamma$ . As fases  $k$ - e  $\gamma$ - contendo muito silício produzem aparas pequenas o que garante uma boa maquinabilidade.

As características deste latão são mostradas na Tabela 16.

*Tabela 16 – Características do latão Diehl 430 PbF (Messing 2005)*

<b>Maquinabilidade</b>	Maior desgaste da ferramenta comparando com o CuZn39Pb3	
<b>Forjamento</b>	Intervalo de Temperatura	Estreito
	Força de Forjamento	Um pouco maior
<b>Conformação a Frio</b>		Bom
<b>Conformação a Quente</b>		Muito bom
<b>Soldadura</b>	Soldadura por Resistência	Bom
	Soldadura por Gás	Bom
	Brazagem	Muito Bom
	Soldadura Leve	Muito Bom
<b>Tratamento Superficial</b>	Polimento	Bom
	Eletrodeposição	Bom
<b>Tratamentos Térmicos</b>	Recozido para Relaxação de Tensões	200 – 400 °C
	Recozido Leve	550-700°C

Porém, este latão apenas é fornecido em forma de tubo ou varão e apenas pode ser usado para maquinagem e não para fundição. No entanto pode ser usado na produção de torneiras por maquinagem.

- **ECOMERICA**

As ligas ECOMERICA são ligas com uma baixa concentração de chumbo para componentes e condutas de água potável que respeita os requisitos das normas americanas para as limitações do uso de chumbo (Diehl 2015).

As ligas ECOMERICA com baixa concentração de chumbo são as seguintes (Diehl 2015):

- CuZn38AS
- CuZn42
- CuZn40

Esta empresa também fornece as ligas CUPHIN/ECOBASS, que são ligas que vão mais longe que os requisitos das normas americanas contendo uma percentagem máxima de chumbo inferior a 0.1% (Diehl 2015).

As composições químicas das quatro ligas acima referidas são mostradas na Tabela 17.

*Tabela 17 – Composição química das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015)*

<b>Composição Química</b>						
<b>Nome</b>	<b>Liga</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Zn (%)</b>	<b>Pb (%)</b>	<b>Outros elementos (%)</b>	<b>ISO</b>
<b>ECOMERICA</b>	062	61.5 – 63.5	Rem.	<0.2	As= 0.02 – 0.15	CuZn38As
<b>ECOMERICA</b>	057	57.0 – 59.0	Rem.	<0.2	-	CuZn42
<b>ECOMERICA</b>	013	59.5 – 61.5	Rem.	<0.2	-	CuZn40
<b>CUPHIN/ECOBASS</b>	430	73.0 – 77.0	Rem.	<0.09	P= 0.4 – 0.10 Si= 2.7 – 3.4	CuZn21Si3P

As propriedades mecânicas das ligas são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Propriedades mecânicas das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015)

Propriedades Mecânicas (Valores de Referência)						
Nome	Liga	Tensão de Rotura (MPa)	Tensão Limite Elástico 0.2 (MPa)	HB	Ductilidade (%)	ISO
ECOMERICA	062	400	250	120	30	CuZn38As
ECOMERICA	057	500	330	150	20	CuZn42
ECOMERICA	013	450	290	130	25	CuZn40
CUPHIN/ECOBRESS	430	700	410	200	25	CuZn21Si3P

As propriedades das ligas relativamente à corrosão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Propriedades relativamente à corrosão das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015)

Propriedades de Corrosão				
Nome	Liga	Resistência à Dezincificação	Resistência à corrosão sob tensão	ISO
ECOMERICA	062	Muito Bom	Mau	CuZn38As
ECOMERICA	057	Mau	Mau	CuZn42
ECOMERICA	013	Mau	Mau	CuZn40
CUPHIN/ECOBRESS	430	Muito Bom	Muito Bom	CuZn21Si3P

As propriedades de processamento das ligas referidas são mostradas na Tabela 20.

Tabela 20 – Propriedades de processamento das ligas CuZn38AS, CuZn42, CuZn40 e CUPHIN (Diehl 2015)

Propriedades de Processamento						
Nome	Liga	Índice de Maquinagem (%)*	Formabilidade a Quente	Formabilidade a Frio	Polimento	Polimento Eletromecânico
ECOMERICA	062	50	Média	Boa	Muito Bom	Bom
ECOMERICA	057	70	Muito Boa		Muito Bom	Bom
ECOMERICA	013	50	Muito Boa	Média	Muito Bom	Bom
CUPHIN/ECO BRASS	430	80	Muito Boa	Boa	Muito Bom	Bom

\*CuZn39Pb3: 100 %

### 2.3.3.3 O Efeito dos Elementos de Liga na Maquinabilidade dos Latões

A maquinabilidade refere-se à facilidade ou dificuldade com que um material pode ser maquinado (Vilarinho et al. 2005).

Devido à grande quantidade de operações de maquinagem presentes na fabricação de componentes em cobre, são normalmente adicionados diferentes elementos de liga que facilitem a maquinagem (Nobel et al. 2014).

O chumbo é um elemento que se adiciona aos latões para melhorar a maquinabilidade permitindo que e os latões possam ser usados em peças para canalizações. A adição de chumbo torna mais fácil o arranque de aparas durante a maquinagem, reduz o desgaste das ferramentas e torna aplicáveis vários parâmetros de corte (Nobel et al. 2014; Vilarinho et al. 2005).

De acordo com investigações antigas, a adição de chumbo aos latões aumenta de forma eficaz a maquinabilidade, mas para concentrações de chumbo superiores a 3% não foi vista qualquer melhoria. Foi considerado que a percentagem ótima de chumbo a adicionar ao latão era entre 1 a 3%, sendo que este valor depende da fração volúmica das fases  $\beta$  e  $\alpha$  presentes na microestrutura. A fase  $\beta$ , como consequência da sua dureza, afeta positivamente a maquinagem promovendo a fragmentação das aparas de material, ao contrário da fase  $\alpha$  que leva a aparas longas e elípticas (Vilarinho et al. 2005).

Estes aspetos podem ser explicados por dois fenómenos básicos. Em primeiro lugar, a solubilidade do chumbo no latão é baixa e, consequentemente, o chumbo segrega nas juntas de grão, em toda a microestrutura. Isso faz com que a tensão de corte seja reduzida, facilitando o

arranque de aparas. Em segundo lugar, a temperatura de fusão do chumbo é baixa ( $T_{\text{chumbo}}=327.5^{\circ}\text{C}$ ) e por isso, durante o corte, um fino filme de cobre semifluido reduz o atrito, levando a uma redução da tensão de corte e do desgaste da ferramenta. Também a distribuição e uniformidade dos glóbulos de chumbo funcionam como fator de arrefecimento (Nobel et al. 2014; Vilarinho et al. 2005).

No entanto, como já referido nesta dissertação, a utilização do chumbo em ligas de cobre foi restringido, dependendo do país e aplicação, a um teor máximo admissível de 0.1% de chumbo (Diretiva 2011/65/EU [RoHS] e de 0.25 % (Lei da Água Potável EUA). A maquinabilidade dos latões sem chumbo é significativamente pior quando comparado com os latões com chumbo, devido à formação de grandes aparas levando a um grande desgaste da ferramenta e, consequentemente, a uma perda de produtividade e estabilidade do processo (Nobel et al. 2014).

(Nobel et al. 2014) realizou um estudo onde é analisado o efeito da microestrutura e do silício como elemento de liga alternativo ao chumbo na maquinabilidade de ligas sem chumbo.

Neste estudo, a maquinabilidade dos latões CuZn37, CuZn38AS e CuZn42, bem como o latão especial CuZn21Si3P foram investigados e comparados com o latão com chumbo CuZn39Pb3.

Na Tabela 21 pode-se ver a composição química dos latões usados no estudo.

*Tabela 21 – Latões usados no estudo de (Nobel et al. 2014)*

Latão (EN)	Latão	Cu	Zn	Pb	Si	As	P
<b>CW724R</b>	CuZn21Si3P	75.86	21	0.02	3.4		0.05
<b>CW508L</b>	CuZn37	62.97	37	0.01			
<b>CW511L</b>	CuZn38As	62	38	0.18		0.07	
<b>CW510L (A)</b>	CuZn42 (A)	57.38	42	0.07			
<b>CW510L (W)</b>	CuZn42 (W)	57.76	42	0.18			
<b>CW614N</b>	CuZn39Pb3	57.61	39	3.32			

Principalmente decisivo para a microestrutura e, consequentemente, para maquinabilidade é a percentagem de cobre e zinco. Em geral, os latões que contêm um percentagem de zinco até 37.5 %, a sua microestrutura é quase só composta pela fase  $\alpha$ . A estrutura cristalina desta fase é cúbica de faces centradas (FCC) e, os latões que contêm uma grande quantidade de fase  $\alpha$ , possuem baixa dureza e grande ductilidade. Este é o caso dos latões CuZn37 e CuZn38As que contem 90 a 98% de fase  $\alpha$ , como se pode ver na Figura 40 b) e c). A grande diferença entre estes dois latões é o teor de chumbo.

O aumento do teor de zinco para valores superiores a 38 % resulta num aumento da percentagem da fase  $\beta$ . O latão CuZn42 contém uma percentagem de zinco de 42 % e por isso, a percentagem



de fase  $\beta$  e fase  $\alpha$  está balanceada, como se pode ver na Figura 40 (d) e (e). A fase  $\beta$  possui um estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (BCC) que é muito mais dura e menos dúctil que a fase  $\alpha$ . (Nobel et al. 2014) usou dois latões, CuZn42 (A) e CuZn42 (W) para comparar o efeito do chumbo restante na liga.

O latão com chumbo CuZn39Pb3 possui 39 % de zinco e 3.32 % de chumbo, resultando numa microestrutura com 70 % de fase  $\alpha$  e 30 % fase  $\beta$ , como se pode ver na Figura 40 (f).

O latão especial CuZn21Si3P tem 3.4 % de silício. Devido ao baixo teor de zinco (21 %), o material contém uma grande percentagem de fase  $\alpha$  (aproximadamente 60 %). Porém, a fase  $\kappa$ , rica em silício, frágil e altamente abrasiva conduz a uma alta dureza e resistência a tração do latão. Também, compostos intermetálicos ( fases  $\gamma$ ) são segregados nas fronteiras de grão.

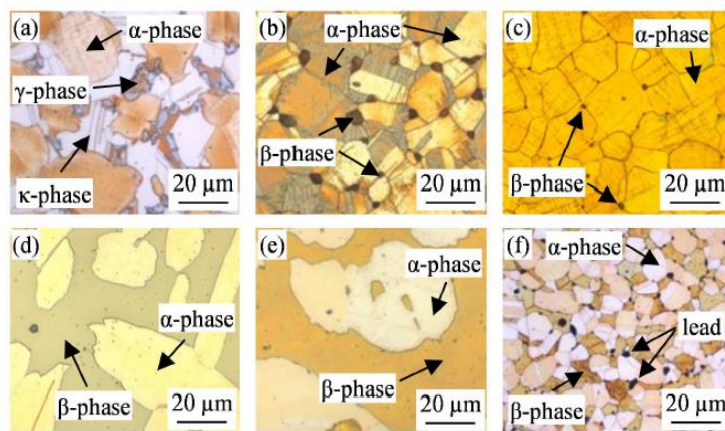


Figura 40 - Microestrutura dos latões (a) CuZn21Si3P, (b) CuZn37, (c) CuZn38As, (d) CuZn42 (A), (e) CuZn42 (W) e (f) CuZn39Pb3 (Nobel et al. 2014)

As características mecânicas e térmicas dos latões estudados por (Nobel et al. 2014) são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Características mecânicas e térmicas dos latões estudados por (Nobel et al. 2014)

Latão	Tensão de Rotura Rm/MPa	Tensão Limite Elástico Rp <sub>0.2</sub> /MPa	Dureza HB	Ductilidade (%)	Condutividade Térmica $\lambda$ /(W/mK)
<b>CuZn21Si3P</b>	654	400	210	21	35
<b>CuZn37</b>	385	268	135	41	120
<b>CuZn38As</b>	392	313	126	22	114
<b>CuZn42 (A)</b>	478	310	134	25	113
<b>CuZn42 (W)</b>	484	315	157	29	139
<b>CuZn39Pb3</b>	456	324	154	26	123

O estudo de (Nobel et al. 2014) para determinar a influência da microestrutura dos latões em estudo na maquinabilidade centrou-se em três principais aspetos:

- Arranque de Apara;
- Carga Termomecânica da Ferramenta;
- Desgaste da Ferramenta.

Relativamente à carga termomecânica da ferramenta pode-se ver na Figura 41 (a) e (b) que a liga de chumbo requer menor força de corte e a temperatura da ferramenta também é menor.

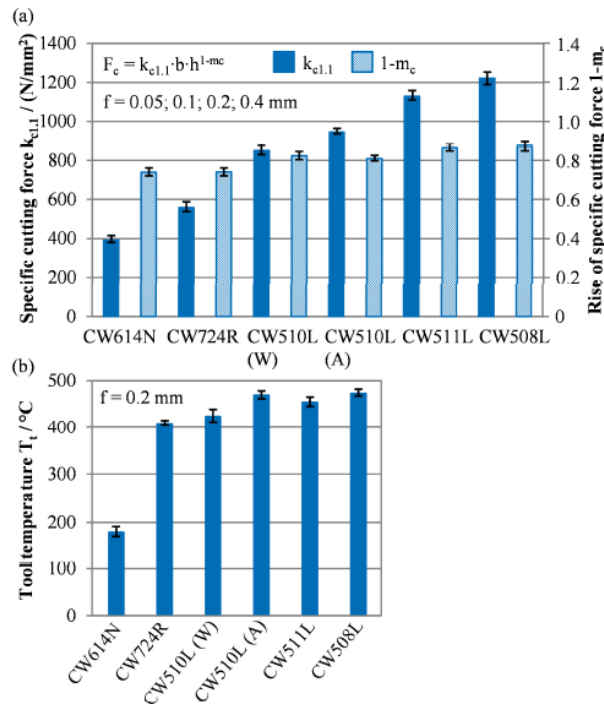


Figura 41 – (a) Esforço cortante específico para cada latão estudado; (b) Temperatura da ferramenta durante a maquinagem dos latões estudados; (Nobel et al. 2014)

Perante este estudo, (Nobel et al. 2014) concluiu que, em comparação com o latão com chumbo CuZn39Pb3, os outros latões produzem maiores aparas, as forças de corte são mais elevadas, assim como a temperatura de corte, levando a um maior desgaste da ferramenta. Isto aplica-se principalmente aos latões dúcteis, que possuem um alto teor de fase  $\alpha$ , como é o caso do latão CuZn38As. Comparando com o latão sem chumbo especial com silício (CuZn21Si3P), notou-se um melhoramento na maquinabilidade em termos da maior facilidade de arranque de apra e menor carga termomecânica da ferramenta, no entanto, a fase k, sendo muito abrasiva, provoca um grande desgaste do flanco da ferramenta.

#### 2.3.3.4 Latões com Bismuto e seus Problemas.

A troca do chumbo pelo bismuto nos latões deve-se ao facto de este agir da mesma maneira que o chumbo em variados aspetos. O bismuto encontra-se ao lado do chumbo na tabela periódica e o seu ponto de fusão é de 271° C o que é mais baixo que o chumbo, fazendo com que o comportamento do bismuto durante a fundição e a solidificação seja semelhante ao comportamento do chumbo. Para além disso, torna as aparas arrancadas por maquinagem mais pequenas e consequentemente mais fáceis de remover. A principal vantagem do uso de bismuto em substituição do chumbo é pelo facto de este, ao contrário do chumbo, não ser tóxico para os humanos, exceto no caso de consumido em doses muito grandes (SeBiLOY Sem data).

Segundo (La Fontaine e Keast 2006), existe o problema de o bismuto segregar no cobre como uma única camada atómica nas fronteiras de grão. Esta camada atómica única de bismuto tem alguns efeitos drásticos nas propriedades mecânicas, fazendo com que este passe de um dos metais

mais dúcteis para um metal muito mais frágil. O enfraquecimento das fronteiras de grão do cobre pelo bismuto é um clássico sistema de enfraquecimento e de segregação que tem sido muito estudado.

O estudo de La Fontain, que consiste na comparação de dois latões com composições semelhantes, um com chumbo e outro com bismuto, é um estudo a ter em conta relativamente ao uso de bismuto em substituição do chumbo.

Os latões examinados foram o latão convencional (C84400) e o latão EnviroBrass II (C89520). As composições nominais e medidas dos latões estudados são apresentadas na Tabela 23.

*Tabela 23 – Composição química dos latões examinados no estudo de (La Fontaine e Keast 2006)*

	C84400		C89520 (EnviroBrass II)	
	Nominal	Medido	Nominal	Medido
<b>Cu</b>	81	80.8	85-87	86.5
<b>Sn</b>	3	2.9	4-9	5.2
<b>Pb</b>	7	6.3	0.25	0.1
<b>Zn</b>	9	9.4	2-6	5
<b>Bi</b>	-	-	1.5-2.5	1.4
<b>Se</b>	-	-	0.8-1.2	0.8
<b>Ni (com Co)</b>	1	0.55	1	0.32

As conclusões retiradas deste estudo foram as seguintes (La Fontaine e Keast 2006):

- Existe uma grande diferença do tamanho de grão, sendo maior no latão sem chumbo, pois o tamanho de grão é muito sensível à composição da liga;
- Ocorreu concentração excessiva de estanho à volta das partículas e nas fronteiras de grão, fenómeno esse conhecido como *Coring*;
- O *Coring* previne a segregação do bismuto nas fronteiras de grão e isso melhora a maquinabilidade do latão, todavia será necessário aumentar a concentração de estanho para lá dos valores usados normalmente nos latões convencionais.

Um estudo também a ter em conta, centrando a atenção na formação de fissuras durante a maquinagem devido a segregação do bismuto no cobre, é o estudo realizado por (Martinez-Hernandez et al. 2013). Após a análise dos parâmetros dos processos de fundição em moldações permanentes para uma torneira de latão amarelo, que foi substituída por uma liga de cobre sem chumbo concluiu que a localização das fissuras correspondem às regiões que solidificaram em último lugar. Uma análise pormenorizada mostrou a presença de uma alta concentração de bismuto nessas áreas. Concluiu também, através de observações experimentais, que durante o arrefecimento ocorre fissuração a quente (hot tearing) na fase inicial, logo o bismuto segrega para

a fronteira sólido-líquido causando um enfraquecimento dessa área durante a maquinagem. Para evitar este defeito é necessário baixar a temperatura do metal líquido e da moldação (Martinez-Hernandez et al. 2013).

Porém, existe uma recomendação pelo European Copper Institute para não usar o bismuto em substituição do chumbo. Este instituto diz que a reciclagem das ligas de cobre com bismuto é muito mais complicada que a reciclagem das ligas de cobre com chumbo.

Segundo (Institute 2007), o chumbo contido nas ligas de cobre é 100% reciclável e sendo de facto muito reciclado devido ao seu valor intrínseco.

Com o bismuto isto não acontece pois este não forma soluções sólidas com uma grande parte dos elementos como por exemplo o alumínio, o cobre, o ferro e o magnésio. O bismuto é praticamente insolúvel nestes elementos no estado sólido.

Para fazer a reciclagem de materiais com bismuto é necessário estabelecer um circuito de reciclagem separado, incluindo fundição, para a sucata e limalhas contendo bismuto. Este circuito deve ser estritamente separado dos circuitos de reciclagem dos cobs com chumbo e de outros metais. Por isso, a presença de bismuto na sucata pode prejudicar a indústria do cobre. A reciclagem do bismuto não é considerada tecnicamente e organizacionalmente fazível e resulta em trabalhos adicionais e um significativo aumento dos custos e uma potencial redução de produção.

Para além dos problemas de reciclagem o European Copper Institute apresenta os seguintes problemas no uso do bismuto nas ligas de cobre (Institute 2007):

- O uso de bismuto, como um grande elemento de liga para os latões e como substituto do chumbo soldas e revestimentos, irá ter efeitos negativos nos ciclos de vida de outros metais como o ferro fundido e alumínio para fundição;
- Os efeitos do bismuto no ambiente e na saúde pública não estão bem compreendidos. Não existe bismuto suficiente no mundo para substituir todo o chumbo presente nos latões, revestimentos e soldas. Uma substituição parcial do chumbo pelo bismuto é mais perigosa que uma substituição total no que diz respeito à reciclagem dos mesmos;
- O bismuto não oferece as mesmas vantagens técnicas do chumbo;

### 2.3.4 Refinamento de Grão

O refinamento de grão é um procedimento muito usado em várias ligas para fundição e para forjamento. As propriedades mecânicas das ligas podem ser melhoradas reduzindo o tamanho de grão. O refinamento de grão é também conhecido por melhorar as características de vazamento como a fluidez e a fissuração a quente. O uso do refinamento de grão não é muito usado em ligas de cobre para fundição em areia. Porém, para fundição em moldações permanentes, este procedimento é muito comum para combater o problema da fissuração a quente bem como melhorar estanquicidade das peças para canalizações, como é o caso das torneiras.

O refinamento de grão pela adição de elementos de liga é feito através de três formas. A primeira forma é através da inoculação, onde uma partícula nucleia um novo grão em que o espaçamento de rede do inoculante e da frente de solidificação são semelhantes. Para que este fenómeno ocorra as partículas devem estar presentes no metal fundido bem antes de o banho atingir a temperatura de *líquidus*.

As outras duas formas acontecem durante o processo de solidificação. A segunda forma de refinamento de grão é através da inibição de crescimento através de super-arrefecimento constitucional onde o soluto posiciona-se à frente do avanço da interface sólido-líquido forçando a composição a baixar para além do equilíbrio. A terceira possibilidade é também através da inibição do crescimento do grão onde soluto é absorvido para a interface sólido-líquido e destrói as dendrites (M. Sadayappan 2004).

Tem sido feito um grande trabalho de pesquisa em vários aspetos na fundição em moldações permanentes de ligas de cobre, incluindo o refinamento de grão pela Materials Technology Laboratory (MTL) desde 1991. Este laboratório chegou às seguintes conclusões (M. Sadayappan 2004):

- O boro refina o grão dos latões vermelhos sem chumbo, enquanto que o zircónio refina os latões vermelhos com chumbo;
- O tamanho de grão da liga EnviroBrass II pode ser refinado pela adição de zircónio.
- O tamanho de grão de um latão amarelo pode ser refinado pelo boro independentemente do teor de estanho;
- A liga EnviroBrass III pode ser refinada pela adição de boro até um teor de estanho de 0.3%. Para maiores concentrações de estanho deve-se usar zircónio;
- Os latões sem chumbo com silício podem ser refinados apenas com zircónio;
- O refinamento de grão melhora a resistência à fissuração a quente nas ligas de cobre;
- Surgem pontos duros nos latões amarelos quando estes contém muito ferro ( $>0.05\%$ ) quando o seu tamanho de grão é refinado com boro. Estes pontos duros podem criar “caudas de cometa” durante o polimento e a lixagem;
- O refinamento de grão de algumas ligas de cobre pode aumentar a fluidez de vazamento em moldações permanentes.

Segundo o estudo de (M. Sadayappan 2004), os efeitos dos elementos de liga na microestrutura nos latões são os seguintes:

- A microestrutura da liga Cu- 36%Zn é largamente modificada através da adição de estanho, chumbo, bismuto e alumínio;
- O chumbo e o bismuto reduzem o tamanho de grão das ligas de cobre-zinco;

- O alumínio modifica as fases na liga promovendo a fase  $\beta$ . Esta alteração nas fases promove uma redução do tamanho de grão da liga;
- O estanho por si só não reduz o tamanho de grão das ligas de cobre-zinco mas reduz a quantidade de elemento refinador necessário para refinar o grão;
- O tamanho de grão das ligas de cobre-zinco com chumbo ou bismuto já é bom (cerca de 300  $\mu\text{m}$ ).

O estudo experimental de (M. Sadayappan 2004) sobre os refinadores de grão é muito importante para perceber os efeitos destes quando adicionados às ligas de cobre-zinco. Neste estudo foram usadas quatro ligas, uma liga amarela, um latão/silício, um bronze/silício e a liga EnviroBrass III.

A composição das ligas usadas são apresentadas na Tabela 24.

*Tabela 24 – Composição das ligas usadas no estudo de (M. Sadayappan 2004)*

<b>Elemento</b>	<b>Latões Amarelos</b>	<b>EnviroBrass III</b>	<b>Latão com Silício</b>	<b>Bronze com Silício</b>
<b>Zn</b>	36.5	36.5	14	5
<b>Sn</b>	0.3	0.3	-	-
<b>Pb</b>	1.5	-	-	-
<b>Bi</b>	-	0.9	-	-
<b>Si</b>	-	-	4.5	4.5
<b>Al</b>	0.4	0.4	-	-
<b>Outros</b>	-	0.04 Se; 0.5 Ni	-	-
<b>Cu</b>	Rem.	Rem.	Rem.	Rem.

Após o estudo dos efeitos dos refinadores de grão nestas ligas, tiraram-se as seguintes conclusões (M. Sadayappan 2004):

- O boro refinou o tamanho de grão das ligas Yellow Brass e EnviroBrass III. Uma concentração mínima de 10 ppm é necessária;
- O boro não foi eficaz como refinador nas ligas latão/silício e bronze/silício;
- O zircônio refinou o tamanho de grão de todas as ligas, porém os efeitos da adição de zircônio é diferente de liga para liga.

## **2.4 Materiais Usados em Coquilhas e Machos e suas Características**

Na produção de grandes séries de peças por fundição pretende-se obter bom acabamento superficial e bom rigor dimensional. Um dos aspetos que mais influencia estes fatores é a qualidade das ferramentas usadas no processo, principalmente as coquilhas e os machos, pois estes é que irão dar forma às peças e qualquer irregularidade é transferida diretamente para a peça afetando a qualidade final das peças fundidas.

### **2.4.1 As Coquilhas**

As coquilhas estão sujeitas a condições de trabalho severas, principalmente devido às flutuações térmicas a que estão sujeitas durante o ciclo de vazamento, solidificação, arrefecimento das peças, extração e arrefecimento e revestimento das coquilhas. Quanto mais altas forem as temperaturas de fusão das ligas vazadas, maiores são estas flutuações e consequentemente mais severas são estas condições para as coquilhas. Por isso, normalmente, usam-se coquilhas no vazamento de ligas de médio ou baixo ponto de fusão como é o caso das ligas de zinco, alumínio e magnésio, ou em ligas de ponto de fusão moderadamente elevado, como no caso das ligas de cobre. Os ferros fundidos também podem ser vazados em moldações permanentes mas existem riscos de têmpera ledeburítica (Marques 2010).

As coquilhas, durante todo o processo de fundição, são sujeitas às seguintes condições (Marques 2010):

- Solicitações termomecânicas;
- Oxidação;
- Temperaturas de trabalho;
- Erosão devido à passagem da corrente líquida durante o vazamento e enchimento da moldação;
- Eventual dissolução do material da coquilha pelo metal líquido vazado;
- Possível reação com as escórias;
- Corrosão a quente em contacto com a atmosfera, água, ou outros líquidos presentes no revestimento.

Devido a todos estes fatores, é necessário ter em conta o material a usar na construção das coquilhas. Estes materiais devem ser escolhidos em função do pretendido, pois em alguns casos devem proporcionar arrefecimentos rápidos para ciclos de vazamentos rápidos e noutros casos arrefecimentos lentos para evitar certos defeitos como por exemplo estruturas de têmpera. Porém, o arrefecimento não deverá ser rápido demais pois podem surgir problemas de solidificação de zonas de passagem de material antes de a moldação estar completamente cheia.

Os materiais usados na construção de coquilhas devem ter resistência e dureza suficientes para não se danificarem durante o manuseamento e ter uma vida longa. É necessário que estes mantenham a estabilidade dimensional e estrutural durante os ciclos de trabalho. As coquilhas não podem ter variações dimensionais drásticas devido aos ciclos térmicos pois iriam criar defeitos nas peças finais. Estas variações poderiam também resultar em fissurações na coquilha (Marques 2010).



Os materiais tradicionalmente usados no fabrico de coquilhas são os seguintes (Society 1984; Duarte 2014; Melo 2014; Neto 2014; Schmid 2009):

- Ferro Fundido Cinzento (FFC);
- Aços de ferramentas para trabalho a quente;
- Ligas de Cobre – Berílio.

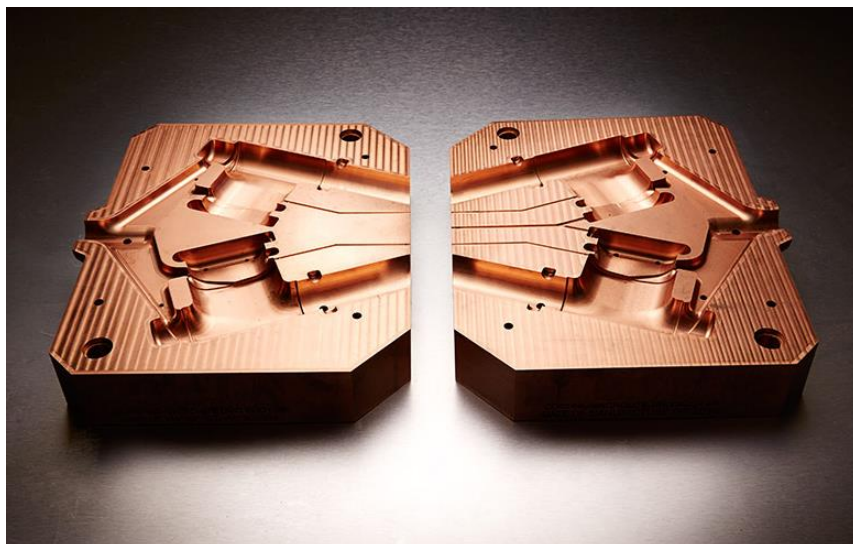
O ferro fundido cinzento é um material muito usado quando o número de peças a produzir é relativamente baixo (Duarte 2014).

Os aços para ferramentas são utilizados normalmente para séries elevadas ou muito elevadas pois é um aço que confere elevada resistência mecânica a altas temperaturas. São aços com percentagem de carbono entre 0.30% a 0.40%, geralmente ligados ao Tungsténio, Molibdénio, Vanádio e Crómio o que permite uma elevada resistência ao desgaste e elevada resistência à fissuração por fadiga térmica (Duarte 2014; Schmid 2009).

Quando é necessário uma condutividade térmica muito elevada combinada com uma maior resistência à fadiga usam-se as ligas de cobre-berílio. São ligas normalmente tratadas termicamente de forma a dar-lhes elevada tensão limite elástica e boa resistência à corrosão. São ligas muito usadas nas coquilhas para vazamento de latões (Duarte 2014).

Centrando as atenções nas ligas de cobre-berílio, sendo esta a liga usada pela CIFIAL na construção das coquilhas, estas ligas dão à coquilha uma vida útil muito superior às coquilhas fabricadas em aço, juntando o facto das ligas de cobre-berílio terem uma excelente condutividade térmica, muito útil para garantir o arrefecimento direcional necessário no vazamento de ligas de cobre (Melo 2014).

Na Figura 42 pode-se ver um exemplo de uma coquilha construída em liga de Cobre-Berílio.



*Figura 42 – Coquilha construída em liga de Cobre – Berílio (Patternmaking 2015)*

A utilização destas ligas tem as seguintes vantagens (Melo 2014):

- Boa estabilidade dimensional;
- Boa resistência à oxidação;
- Menor tendência à fissuração por fadiga térmica;
- Permite um bom aspeto superficial das peças vazadas;
- Excelente condutividade térmica.

Porém, o uso destas ligas também tem desvantagens, que são as seguintes:

- Dificuldade de reparação (Melo 2014);
- Custo elevado (Marques 2010) ;
- O berílio é considerado cancerígeno e muito prejudicial para a saúde (HSE 2013);

Na Tabela 25 estão apresentados dois exemplos de ligas de cobre-berílio usadas na construção de coquilhas para fundição (Schmelzmetall 2006).

*Tabela 25 – Composição química das ligas CuBe2 e CuNi2Be (Schmelzmetall 2006)*

Liga	Normas		Composição Química (%)							
	DIN	UNS	Ni	Be	Co	Fe	Co+Ni	Si	Outro	Cu
CuBe2	2.1247	C17200	0 – 0.3	1.8 – 2.0	0-0.3	0.1 max	0.2 – 0.5	0.1 max	0.5 max	Restante
CuNi2Be	2.0850	C17510	1.4 – 2.4	0.2-0.6	0.3 max	0.2 max		0.2 max	0.5	Restante

As propriedades mecânicas das ligas referidas são apresentadas na Tabela 26 (Schmelzmetall 2006).

*Tabela 26 – Propriedades mecânicas das ligas CuBe2 e CuNi2Be (Schmelzmetall 2006)*

Propriedades Mecânicas	Ligas			
	CuBe2		CuNi2Be	
	Endurecida	Tratada Termicamente	Endurecida	Tratada Termicamente
<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	Min. 1150	Max. 600	Min 650	-
<b>Tensão Limite Elástico (MPa)</b>	Min. 1000	Max. 350	Min. 500	-
<b>Dureza Brinell HB</b>	Min. 350	Max. 125	Min 200	-
<b>Ductilidade (%)</b>	Min. 3	Min. 35	Min. 10	-

Na Tabela 27 podem-se ver mais alguns parâmetros referentes a estas ligas (Schmelzmetall 2006).

*Tabela 27 – Características das ligas CuBe2 e CuNi2Be (Schmelzmetall 2006)*

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Ligas</b>	
	<b>CuBe2</b>	<b>CuNi2Be</b>
<b>Módulo de Elasticidade</b> (N/mm <sup>2</sup> )	135.000	135.000
<b>Massa Volúmica</b> (g/cm <sup>3</sup> )	8.3	8.85
<b>Condutividade Térmica</b> (W/mK)	160 (média 20 <sup>0</sup> C - 300 <sup>0</sup> C)	270-320 (média 20 <sup>0</sup> C - 300 <sup>0</sup> C)
<b>Coeficiente de Expansão Térmica</b> (x10 <sup>-6</sup> / <sup>0</sup> K)	17.0 (média 20 <sup>0</sup> C - 300 <sup>0</sup> C)	17.2 (média 20 <sup>0</sup> C - 300 <sup>0</sup> C)
<b>Intervalo de Fusão</b> ( <sup>0</sup> C)	870-970	1000-1030

No entanto existe um problema no uso de berílio como elemento de liga para a construção de coquilhas para fundição.

O berílio é um metal leve, resistente e o seu óxido (berília) cerâmico branco duro. Como já foi referido este material confere propriedades excelentes às coquilhas para fundição, mas o berílio e os seus derivados podem causar problemas de saúde (HSE 2013).

O berílio pode entrar no organismo pelas seguintes formas (HSE 2013):

- Inalação de poeiras, fumos ou sais solúveis contendo berílio;
- Contacto com a pele ou olhos de sais solúveis contendo berílio;
- Ingestão devido ao facto de comer ou beber em áreas onde os sais solúveis de berílio são usados.

Existem vários problemas de saúde que o berílio poderá acarretar, sendo os seguintes (HSE 2013):

Para pequenas exposições ao berílio ou aos seus derivados:

- Inflamação dos pulmões;
- Inflamação dos olhos;
- Irritação da pele.

Para exposições frequentes ao berílio ou aos seus derivados:

- Doenças de pele;
- Doenças pulmonares.

Foi estudado que uma longa exposição ao berílio pode causar cancro do pulmão.

Existe então uma grande probabilidade de uma restrição ou mesmo proibição do uso de berílio num futuro próximo. É necessário então pensar em novas ligas que poderão ser usadas na construção de coquilhas.

Existem no mercado algumas ligas sem berílio também indicadas para a construção de coquilhas.

Na Tabela 28 estão apresentados dois exemplos (AFIR 2014).

*Tabela 28 – Composição química das ligas CuCrZr e CuNi2Si (AFIR 2014)*

Liga	Norma		Composição Química (%)				
	DIN	UNS	Ni	Zr	Cr	Si	Cu
<b>CuCrZr</b>	2.1293	C18150	-	0.03-0.3	0.2	Max 0.1	Restante
<b>CuNi2Si</b>	-	C18000	2.0 – 3.0	-	0.4 – 0.6	0.4 – 0.7	Restante

As propriedades mecânicas das ligas acima referidas são apresentadas na Tabela 29 (AFIR 2014).

*Tabela 29 – Propriedades mecânicas das ligas CuCrZr e CuNi2Si (AFIR 2014)*

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Ligas</b>	
	CuCrZr	CuNi2Si
<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	400 - 485	600 – 655
<b>Tensão Limite Elástico (MPa)</b>	325 - 380	550 – 605
<b>Dureza Brinell HB</b>	110 - 150	190 – 220
<b>Ductilidade (%)</b>	8 - 25	8 - 14

Na Tabela 30 podemos ver mais alguns parâmetros importantes referentes as estas ligas (AFIR 2014).

*Tabela 30 – Características das ligas CuCrZr e CuNi2Si (AFIR 2014)*

<b>Características da Liga</b>	<b>Ligas</b>	
	CuCrZr	CuNi2Si
<b>Massa Volúmica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	8.9	8.8
<b>Condutividade Térmica (W/mK)</b>	295	190
<b>Coefficiente de Expansão Térmica (x10<sup>-6</sup>/°K)</b>	17	16

Comparando as ligas de cobre com berílio com as ligas de cobre sem berílio usadas na construção de coquilhas pode-se concluir que:

- As ligas de cobre berílio possuem uma resistência à tração muito superior às ligas sem berílio;
- A dureza das ligas de cobre berílio é muito superior que a das ligas sem berílio;
- Olhando para a condutividade térmica, a liga CuCrZr aproxima-se bastante das ligas de cobre-berílio. Sendo este um aspeto muito importante a ter em conta na construção de coquilhas, esta liga pode ser uma boa alternativa às ligas de cobre-berílio.

#### **2.4.2 Machos**

Na produção de torneiras é fulcral a criação de cavidades internas. Estas são normalmente realizadas através de machos em areia fabricados pelo processo de cura a quente (Dias 2008).

Existem vários processos para a conceção de machos em areia, os quais se enquadram em três categorias que são (Dias 2008):

- Cura a quente ou caixa quente;
- Cura a frio ou caixa fria;
- Cura com gás.

Esta categorização é realizada em função do meio de cura necessário para endurecer a mistura de areia com o ligante. Consoante o tipo de processo são utilizados ligantes orgânicos e inorgânicos.

Centrando as atenções no processo de cura a quente, processo utilizado pela CIFIAL na criação de machos em areia, pode-se dizer que o processo de fabrico de machos por cura a quente caracteriza-se pela necessidade de temperatura para ativar a reação de polimerização resultando no endurecimento da mistura.

Na Tabela 31 seguinte estão representados os processo que se enquadram no processo de criação de machos por cura a quente. Para cada processo refere-se o tipo de ligante, as condições específicas de cura, a quantidade de ligante recomendada, o tempo necessário de cura e o tempo estimado de vida (Dias 2008).

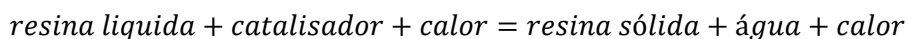
Tabela 31 – Processos de fabrico de machos com meio de cura a quente (Dias 2008)

Processo	Tipo de Ligante	Condições de Cura	Teor de Ligante (%)	Tempo de Cura	Tempo de Vida
<b>Areias de Óleo</b>	Oleos vegetais e/ou minerais	Estufa	1.0 a 4.0	Imediato	2 a 8 horas
<b>Carapaça</b>	PF Novolaque	HMTA – ferramenta quente (250 - 300°C)	2.0 a 6.0	2 a 3 minutos	Infinita
<b>Caixa Morna</b>	AF, UF/AF/PF	Sais de cobre, sais de ácido sulfúrico + ferramenta quente (180-200°C)	1.2 a 2.0	< 1 minuto	2 a 8 horas
<b>Caixa Quente</b>	UF, PF, UF/PF, UF/AF, UF/PF/AF	Sais de ácido + ferramenta quente (220 - 245°C)	1.2 a 2.5	10 a 30 segundos	2 a 6 horas

UF: Ureia-formaldeído; PF: Fenol-formaldeído; AF: Ácido furfurilico; HTMA: Hexametileno tetramina

O processo de cura a quente utilizado pela CIFIAL é o processo de caixa quente.

Este processo consiste em injetar, através da pressão de ar comprimido, a mistura de areia, ligante e catalisador para dentro da caixa de machos, estando esta devidamente fechada e à temperatura recomendada para ocorrer o endurecimento da mistura. A areia adquire a forma interior da caixa de machos e quando são extraídos os machos a cura deve estar finalizada. Esta cura dá-se devido à seguinte reação exotérmica:



Porém, existem machos que não terminam o processo de cura no interior da caixa de machos terminando-a no exterior.

Para que este processo seja produtivo, o tempo de cura deve ser o menor possível e o tempo de vida do macho o maior possível (Dias 2008).



Um dos constituintes importantes para a criação de machos são as areias. As areias usadas para a criação de machos são classificadas em função da sua composição e dividem-se em quatro tipos (Dias 2008):

- Areia de Sílica ( $\text{SiO}_2$ );
- Areia de Zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ );
- Areia de Olivina ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ );
- Areia de Cromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ).

Na Tabela 32 estão apresentadas as propriedades dos quatro tipos de areias.

*Tabela 32 – Principais características dos tipos de areia (Dias 2008)*

<b>Características</b>	<b>Sílica</b>	<b>Zircão</b>	<b>Olivina</b>	<b>Cromite</b>
<b>Forma do Grão</b>	Redondo / Sub-Angular	Redondo	Angular	Angular
<b>Dilatação Térmica</b> <b>(20 - 1200°C)</b>	1.9% (não linear)	0.45%	0.60%	1.10%
<b>Densidade a Granel</b> <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.49	2.77	2.67	1.7
<b>Índice de Finura</b> <b>AFS</b>	50 – 60	102	74	65
<b>Condutividade Térmica</b>	Baixa	Elevada	Elevada	Baixa

Através da análise da Tabela 32 conclui-se que a densidade da areia de sílica é menor, o que é uma grande vantagem para a sua aplicação na fundição. No entanto esta areia apresenta baixa condutividade térmica e um coeficiente de dilatação térmico maior que as outras areias podendo estes fatores trazer problemas na fundição.

Outro constituinte importante do processo de criação de machos é o ligante. O ligante é o produto que juntamente com o catalisador fornece o endurecimento à mistura de areia. No processo de caixa quente são usados ligantes orgânicos e são classificados segundo dois tipos de resinas (Dias 2008):

- **Resinas Fenólicas** – geralmente à base de fenol e formaldeído com pequenas adições de álcool furfurólico. Estas resinas apresentam elevados teores de humidade, atingindo os 25%, podendo atrasar o processo de cura. Este tipo de resina dificulta a homogeneidade total da mistura de areia o que não é desejado.
- **Resinas Furânicas** – geralmente à base de álcool furfurílico e podem ser adicionadas pequenas porções de ureia, fenol e formaldeído. São normalmente isentas de humidade e azoto, elementos prejudiciais ao processo de criação de machos e à qualidade final das peças. São as que possuem melhores propriedades para o processo de fundição pois a libertação de gases é baixa, apresenta boa resistência a quente, o tempo de cura é menor que as fenólicas e garante facilidade de homogeneização. Porém, são mais caras que as fenólicas.

Por fim, o outro constituinte dos machos em areia é o catalisador. O catalisador deve ser escolhido com base em diversos fatores como as propriedades químicas das areias, tempo de cura pretendido, tipo de liga a vazar, entre outros.

Na Tabela 33 estão apresentados os teores de catalisador necessário para três tipos de areia com diferentes teores de ácido.

*Tabela 33 – Tipos de areia (Dias 2008)*

Tipo de Areia	pH	Ácido Necessário
Sílica	6.9	2
Sílica (lago)	6.7	4
Sílica (rio)	6.5	40

Os catalisadores mais usados são os catalisadores à base de soluções aquosas de cloreto de amónio ou nitreto de amónio e ureia.

### 2.4.3 Temperatura de Vazamento

A qualidade final das peças vazadas depende, em grande parte, da temperatura do metal antes do vazamento. Se essa temperatura não for devidamente controlada torna-se mais complicado obter peças com boa qualidade. Não basta realizar todas as operações de controlo e tratamento durante a fusão, pois se a temperatura de vazamento não for controlada, todas as operações realizadas anteriormente deixam de ter importância.

O metal vazado, seja extremamente quente ou extremamente frio cria problemas e defeitos nas peças fundidas.

Por um lado, quando o metal se encontra demasiado quente, a absorção de gases e a oxidação do metal têm tendência a aumentar. As ligas metálicas que possuem um longo intervalo de solidificação tem mais tendência a criar porosidades internas quando se usa uma temperatura de

vazamento demasiado alta. Estando o metal muito quente, no caso das moldações em areia e machos, provoca defeitos por libertação de gases ou mesmo destruição das moldações (Mesquita 1978). Quando o metal vazado está muito quente também pode causar distorções da moldação e contrações na peça (Ferreira 1999).

Estando o metal muito frio, podem ocorrer problemas como peças com cavidades internas devido ao mau funcionamento dos alimentadores, peças mal cheias devido à baixa fluidez do material e inclusões de gás resultantes dos gases residuais no metal não terem tido tempo de se libertarem durante o curto intervalo de solidificação (Mesquita 1978; Ferreira 1999).

Para que nada do referido atrás aconteça é necessário controlar a temperatura do metal antes do vazamento.

Na Tabela 34 podemos ver as temperaturas de vazamento de algumas ligas de cobre mais usadas. Deve-se ter em conta que as temperaturas à saída do forno devem ser superiores em 30 a 50 graus de forma a compensar o arrefecimento do metal fora do forno, durante as operações de desoxidação, limpeza do metal e escorificação (Mesquita 1978).

*Tabela 34 – Temperatura de vazamento de algumas ligas (Mesquita 1978)*

<b>Metal ou Liga</b>	<b>Temperatura de Vazamento ( °C)</b>		
	<b>Peças Delgadas (Espessura &lt;12 mm)</b>	<b>Peças Médias (Espessura de 12 mm a 38 mm)</b>	<b>Peças Espessas (Espessura &gt; 38 mm)</b>
<b>Cobre Comercial</b>	1250	1200	1150
<b>Latão 60/40 e 65/35</b>	1100	1050	1020
<b>Latão 70/30 80/20</b>	1150	1100	1070
<b>Latão de Alta Resistência</b>	1080	1040	1000

#### **2.4.4 Intervalo de Solidificação**

O intervalo de solidificação das ligas é um aspeto muito importante na fundição em moldações permanentes. Este intervalo deve ser baixo e o coeficiente de contração deve ser pequeno, pois se o coeficiente de contração for alto e o intervalo de solidificação for grande não se podem retirar logo as peças da moldação e estas ficam sujeitas a tensões internas tão elevadas que podem romper-se, devido ao facto de a moldação metálica não permitir contração. A liga vazada não deve ser frágil a quente pois, como já referido, se as peças não forem retiradas rapidamente ficam sujeitas a tensões elevadas e podem romper-se (Ferreira 1999).

### **2.4.5 Respiro das Moldações**

Devido ao facto de as moldações metálicas não apresentarem porosidades, um fator a ter em conta quando se usam coquilhas metálicas é a saída de ar da coquilha. É necessário garantir que durante o enchimento, o ar contido na moldação possa sair facilmente, para que as peças não fiquem com defeitos e o enchimento seja rápido. Este é um problema a ter em conta pois não só é necessário que o ar contido dentro da moldação seja retirado como também o ar contido nos gitos seja também retirado, juntando a isto que o enchimento das moldações deve ser realizado num tempo muito curto.

Os sistemas de respiração devem permitir a saída de ar mas não de metal. Por isso os canais de respiro têm espessuras da ordem das décimas de milímetro como valor máximo. Nestas condições o metal vazado não sai devido ao fenómeno de capilaridade ou porque solidifica rapidamente ao entrar em contacto com estes canais.

Outra maneira de promover a saída de ar e de gases é através do acabamento das superfícies de encosto fazendo com que estas não se ajustem perfeitamente, ficando com uma ondulação que origine canais de dimensões convenientes para a respiração da moldação.

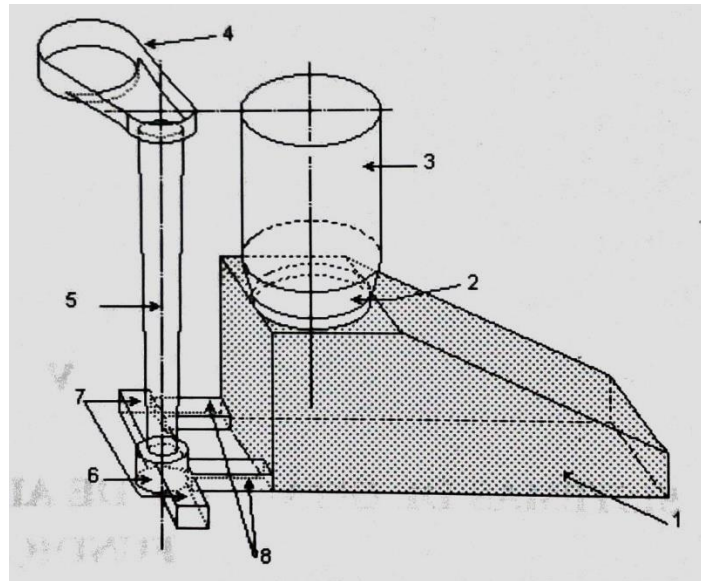
Para além das saídas de ar globais da moldação é necessário ter em conta o respiro local nos pontos de mais difícil evacuação do ar, como é o caso dos cantos e furos da moldação. Um das formas de resolver este problema é através dos machos atribuindo entre estes e as moldações folgas de ajustes na ordem dos décimos de milímetro (Ferreira 1999).

## **2.5 Sistema de Gitagem de Enchimento e Alimentação**

O sistema de gitagem de uma peça de fundição é composto por dois sistemas, constituídos por um conjunto de canais e elementos externos à peça fundida. O primeiro sistema tem como função levar o metal líquido para a cavidade da moldação. O segundo sistema, após a moldação estar cheia, tem a função de compensar a contração do metal da peça, durante a solidificação.

Uma moldação deve ter um sistema de gitagem constituído por canais por onde o metal fundido irá fluir para preencher a cavidade da moldação onde a peça vazada irá solidificar. A estes canais dá-se o nome de gitos de enchimento.

É necessário também um outro sistema de gitos para fazer a alimentação de metal fundido destinado a compensar as contrações que acontecem durante a solidificação, evitando assim a ocorrência de rechupes. A estes canais dá-se o nome de gitos de alimentação (Ferreira 1999). Na Figura 43 podem-se ver os elementos característicos de um sistema de gitagem e alimentação.



*Figura 43 – Elementos característicos dos sistemas de gitagem de enchimento e alimentação (Ferreira 1999)*

**Legenda:**

1 – Peça Vazada

**Gitagem de Alimentação.**

2 – Colo do Alimentador

3 – Alimentador

**Gitagem de Enchimento.**

4 – Bacia de Vazamento

5 – Coluna de Enchimento

6 – Base da Coluna de Enchimento

7 – Canais de Distribuição

8 – Canais de Ataque

### 2.5.1 Alimentadores

A função dos alimentadores só é bem entendida se se perceber o modo como o metal arrefece dentro da cavidade da moldação. O arrefecimento do metal líquido dá-se inicialmente na superfície de contacto entre a parede interna da moldação e o metal, avançando para o interior da peça, à medida que o metal da periferia arrefece e solidifica através da libertação de calor. A partir do momento em que a primeira camada exterior do metal fundido solidifica, a geometria da peça fica definida. O metal contido no interior vai compensando a contração do metal durante a solidificação, ou seja, à medida que cada camada é solidificada existe uma compensação de metal fundido da parte interior da peça em direção à camada solidificada. No final da solidificação existe uma parte da peça onde a contração não foi compensada, conhecida como rechupe, que consiste em um ou vários pontos onde não existe metal. Estes pontos são normalmente correspondentes aos pontos quentes, ou seja, os pontos que solidificaram em último lugar. Os gitos de alimentação, que são ligados à peça em zonas onde é previsível a ocorrência de rechupes, têm a principal e importante função de compensar a contração durante a fase final do arrefecimento (Ferreira 1999; Duarte 2014).

O problema de porosidade de contração pode ser resolvido através do controlo padrão de solidificação e de gradientes térmicos para que os vazios fiquem fora da geometria da peça vazada. Para além disso liga-se à peça reservatórios que serão cheios com metal fundido durante todo o processo de solidificação da peça, para que estes possam abastecer as pontes onde existe falta de material. Estes reservatórios são então os alimentadores (Ferreira 1999).

Um ponto importante a ter em conta é o tempo de solidificação de uma peça metálica vazada numa moldação metálica. Segundo (Ferreira 1999), o tempo de solidificação pode ser calculado pela regra de Chvorinov:

$$t = Kc \left( \frac{V}{S} \right)^2$$

Em que:

$$Kc = \left[ \frac{\rho' \times \sqrt{\pi \alpha Mold} \times [C'e(Tv - Tl) + Cl]}{2K mold(Tim - T_0)} \right]^2$$

Onde:

$Kc$  – Constante característica da liga, do sobreaquecimento e do material da moldação

$V$  – Volume da peça

$S$  – Superfície da peça em contacto com a superfície de extração de calor

$\rho'$  - Massa específica do metal

$\alpha mold$  – Difusividade térmica da moldação

$C'e$  – Calor específico do metal vazado

$Tv$  – Temperatura de vazamento

*Tl* – Temperatura de início de solidificação do metal

*Cl* – Calor latente de fusão do metal

*K<sub>mold</sub>* – Condutibilidade térmica da moldação

*Tim* – Temperatura da interface metal/moldação

*T0* – Temperatura inicial da moldação

Através da aplicação da regra de Chvorinov à peça e aos alimentadores a ela ligados é possível determinar qual deles solidifica em primeiro lugar, permitindo assim perceber se o metal líquido contido no alimentador se encontra neste estado até ao final da solidificação da peça, fazendo com que alimentação seja eficaz.

Pode-se então dizer que o alimentador só é eficaz se o tempo de solidificação do alimentador for superior ao tempo de solidificação da peça vazada (Ferreira 1999):

$$t_{al} > t_p$$

Segundo (Ferreira 1999) existem dois tipos básicos de alimentadores:

- Alimentador de topo ou atmosférico;
- Alimentador cego.

O alimentador de topo ou atmosférico está situado numa cota superior à da peça e a superfície encontra-se em contacto com a atmosfera. Este alimentador pode ser coberto por um material isolante para que a superfície permaneça líquida para que o metal escoe para a peça, não só através da gravidade, mas também através da pressão atmosférica.

O alimentador cego é totalmente embebido na moldação. Para aumentar a eficácia deste alimentador, insere-se no topo um macho poroso que permite o contacto do metal com a atmosfera. O vácuo criado no interior da peça através da contração metálica também ajuda a aumentar a eficácia deste alimentador.

A forma esférica é a forma ideal para um alimentador pois garante um maior tempo de solidificação pois o módulo de arrefecimento do alimentador  $M=V/S$  tem o seu valor maior no caso de uma esfera pois esta apresenta a menor superfície para o volume envolvido. Para moldações permanentes onde o plano de apartação é vertical é fácil obter este tipo de geometria (Ferreira 1999).

A localização dos alimentadores é também importante e para determinar o local deve-se ter em conta o conceito de solidificação direcional. Para evitar o aparecimento de rechupes, a solidificação deve ser direcional, começando nos pontos da peça mais afastados do alimentador, de seguida os pontos intermédios da peça e por fim, no alimentador, onde o último metal a solidificar se deve encontrar (International 2009; Ravi 2005).

O dimensionamento dos alimentadores, de acordo com (International 1998; Ferreira 1999) pode ser realizado através do método dos módulos. Este método baseia-se na regra de Chvorinov. A

equação de Chvorinov foi simplificada por Wlodawer que relativizou a variável tempo pois o interesse deste método consiste essencialmente na comparação entre os tempos de solidificação do alimentador e da peça.

Por isso:

$$t \sim V/A$$

Onde:

V – Volume

A – Area de transferência de calor

t – Tempo de solidificação

O módulo de arrefecimento é proporcional ao tempo de solidificação. Quanto maior for o módulo de arrefecimento maior irá ser o tempo de solidificação. Então é necessário garantir que o módulo de arrefecimento do alimentador seja superior ao módulo de solidificação da peça vazada. Se isto for garantido então o tempo de solidificação dos alimentadores será superior ao tempo de solidificação da peça vazada.

Para calcular o módulo de arrefecimento do alimentador é necessário estabelecer um coeficiente de segurança. Este coeficiente depende do metal a vaziar.

Segundo (Ferreira 1999) os coeficientes de segurança são apresentadas na Tabela 35.

*Tabela 35 – Coeficientes de segurança (Ferreira 1999)*

<b>Metal</b>	<b>Coef. Segurança (k)</b>
<b>Ferro fundido de alta resistência</b>	1.0 – 1.2
<b>Ferro fundido perlítico normal</b>	0.8 – 1.0
<b>Ferro fundido para lingoteiras</b>	0.6 – 0.8
<b>Ferro fundido maleável</b>	1.4
<b>Ferro fundido esferoidal</b>	1.4
<b>Aço</b>	1.2
<b>Níquel, cupro-niqué, metal monel e cupro-aluminio</b>	1.4
<b>Cobre, bronzes, latão 70/30 e 60/40</b>	1.2
<b>Latão de alta resistência</b>	1.4
<b>Ligas leves</b>	1.4



O cálculo do módulo de arrefecimento do alimentador é então feito através da seguinte fórmula (Ferreira 1999; Ravi 2005):

$$M_{alimentador} = k \times M_{peça}$$

### 2.5.2 Sistema de Gitagem de Enchimento

Os componentes básicos de um sistema de gitagem simples para uma moldação horizontal são os seguintes (Ferreira 1999):

- **Bacia de Vazamento** – Proporciona a abertura para a introdução do metal líquido com um dispositivo de vazamento.
- **Coluna de Enchimento** – Por onde o metal líquido segue até se juntar aos canais de distribuição.
- **Canais de Distribuição** – Canais por onde o metal é distribuído.
- **Canais de Ataque** – Canais de contacto entre os canais de distribuição e a moldação.

Os canais de gitagem são muito importantes na obtenção de peças fundidas com as características desejadas. É preciso então respeitar certas especificações. As mais importantes são as seguintes (Ferreira 1999):

- **Controlar as condições de escoamento** - durante o enchimento da moldação deve ser atingida, rapidamente, uma velocidade constante de escoamento no sistema de enchimento. Essas condições de escoamento devem ser mantidas durante todo o processo.
- **Enchimento rápido da moldação** – Este é um parâmetro importante por várias razões. Em peças de secção fina, a perda de calor do metal líquido poderá resultar num arrefecimento prematuro podendo originar defeitos superficiais. O sobreaquecimento do metal fundido retarda o arrefecimento e aumenta a fluidez, mas isso poderá trazer problemas de captação de gases e exagerar a degradação térmica levando a uma redução da vida útil das moldações metálicas.
- **Minimizar a turbulência** – A turbulência no vazamento e escoamento na cavidade da moldação e no sistema de gitos poderá aumentar o desgaste mecânico e térmico da moldação. O maior problema é que a turbulência pode originar defeitos nas peças devido ao arrasto de gases no metal em movimento. Estes gases podem criar defeitos, produzir escória ou inclusões através de reações de oxidação do metal líquido.
- **Remover escória, impurezas e inclusões** – Podem aparecer diversas impurezas nas peças vazadas originárias de fatores externos, por exemplo, da escória do forno e do material refratário da colher de transporte, ou originárias de fatores internos. Estas impurezas podem ser retidas através do uso de filtros cerâmicos que poderão ser introduzidos no sistema de gitagem.
- **Melhorar os custos de produção** – é atribuída uma grande variedade de custos irrecuperáveis ao metal que fica no sistema de gitagem e nos alimentadores. Estes componentes, depois de removidas das peças vazadas, são novamente fundidos mas o seu valor vai sendo cada vez menor até chegar a ser sucata. É necessário então ter em conta a quantidade de metal a usar nos gitos e nos alimentadores.
- **Promover gradientes de temperatura favoráveis** – Devido ao facto de o último metal a entrar na cavidade da moldação ser o mais quente é necessário introduzir metal nas zonas da moldação onde, teoricamente, sejam as últimas a solidificar. Pode-se conseguir

isso dirigindo o metal desde o sistema de enchimento até aos alimentadores. Deve-se criar um sistema de gitagem que crie gradientes favoráveis para que as peças finais tenham as características desejáveis.

Deve-se então tentar chegar a um compromisso entre estas especificações pois não é possível satisfazer todas ao mesmo tempo.

## **2.6 Simulação Numérica**

A simulação numérica pode ser definida como a utilização de um método numérico e um computador para resolver um modelo matemático (Santos 2014). A simulação numérica, hoje em dia, é uma ferramenta muito importante no desenvolvimento de qualquer produto. A maior parte dos fenómenos físicos e químicos respeitam diversas leis de conservação. Usando a simulação numérica é possível obter soluções para sistemas de equações diferenciais complexos, aproximando o sistema em estudo da solução baseando-se nas leis de conservação. Estas soluções são praticamente impossíveis de obter pela resolução analítica (Duarte 2014).

Segundo (Melo 2014) o uso de software adequado permite a análise de vigas, estruturas e componentes individuais sobre o seguinte método: é criada a peça em CAD 3D, analisada pelo software onde é definido o material, as geometrias, as condições e outros parâmetros necessários, é gerada a malha de elementos finitos, definidas as condições de fronteira do sistema, calculadas as cargas a que está sujeita a peça e por fim calculadas as soluções para as equações diferenciais que definem o comportamento mecânico na peça em estudo.

O resultado final é geralmente apresentado num formato que permita uma fácil leitura e interpretação dos resultados da simulação, normalmente através da sobreposição da peça na sua geometria original com cores que ilustram as diferentes condições a que está sujeita cada zona.

O número de elementos finitos determina a precisão e fiabilidade da solução. Na realidade, pode-se considerar que o número de elementos finitos é infinito, por isso, para garantir que a solução é fiável e precisa, deve-se usar o máximo de elementos finitos possível. Porém, quanto maior for o número de elementos finitos mais elevado é o poder de processamento necessário e maior o tempo de cálculo. Por isso é preciso chegar a uma situação que equilibre a precisão de cálculo com o custo da simulação (Duarte 2014; Melo 2014)

O uso da simulação numérica nos processos de fundição é muito importante. A simulação do vazamento e a solidificação das peças a produzir é uma tarefa que implica gasto de tempo e dinheiro mas traz muitos benefícios a curto e a longo prazo. Apesar de se despende tempo e dinheiro a simular o processo de vazamento e solidificação, ao fazer isso evita-se a necessidade de fazer *test runs* e pré-series de ajuste de parâmetros. Os possíveis defeitos que possam surgir derivado da geometria da peça e da moldação podem ser previstos e minimizados. Através das simulações numéricas é também possível estabelecer parâmetros como a temperatura de vazamento, temperaturas das coquilhas ou moldações, velocidades de enchimento, entre outros (Melo 2014).

Estas simulações ajudam os investigadores a perceber melhor a forma de enchimento e de solidificação durante o processo de fundição. As simulações numéricas podem ser divididas em

duas abordagens diferentes, o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas (Wang et al. 2007).

### **2.6.1 Método das Diferenças Finitas**

O método das diferenças finitas (MDF) é baseado nas propriedades da expansão de Taylor e na aplicação direta da definição de derivada. É talvez o método de mais simples aplicação, particularmente em malhas uniformes, mas requer um alto grau de regularidade da malha. A aproximação de diferenças finitas é o mais antigo método aplicado na obtenção de soluções numéricas de equações diferenciais. A ideia do método de diferenças finitas é simples pois corresponde à estimativa da derivada por uma razão de duas diferenças (Santos 2014)

Este método é o mais adequado para a resolução de problemas onde a obtenção de soluções tão específicas não é necessária, mas sim obter soluções para geometrias extremamente grandes (Melo 2014).

### **2.6.2 Método dos Elementos Finitos**

O método dos elementos finitos (MEF) é usado como método geral de aproximação para soluções numéricas de problemas físicos descritos por equações de campo num meio contínuo. As principais diferenças entre este método e o método das diferenças finitas são baseadas essencialmente na generalidade da sua formação.

Este método transforma o espaço físico num espaço computacional cartesiano e divide-o em elementos. A avaliação da função incógnita é feita no interior do elemento através de polinómios interpoladores com base no valor da função nos nós do elemento. Depois, através de uma formulação variacional integral do modelo matemático é possível traduzir o problema físico num sistema de equações lineares ou não lineares. Resolvendo este sistema obtém-se a função incógnita nos nós de cada elemento (Santos 2014).

Na Tabela 36 estão apresentadas as vantagens e as desvantagens dos dois métodos (Santos 2014).

*Tabela 36 – Comparação entre o MDF e MEF (Santos 2014)*

<b>Método</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>MDF – Opera diretamente nas equações diferenciais usando uma aproximação de diferenças finitas para gerar um sistema de equações algébricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremamente geral.</li> <li>• Usado extensivamente em mecânica dos fluidos.</li> <li>• Integração numérica não é necessária.</li> <li>• Matrizes são em banda.</li> <li>• Resolve não-homogeneidades.</li> <li>• Tecnicamente amadurecido.</li> <li>• Formulação rápida de novos problemas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessário o uso de malhas estruturadas.</li> <li>• Difícil de aplicar a problemas infinitos.</li> <li>• Obriga a malhas muito finas.</li> <li>• Modelação de fronteiras e condições de fronteiras complexas.</li> <li>• Provavelmente já atingiu as potencialidades máximas</li> </ul>
<b>MEF – Opera numa equação integral equivalente usando interpolações das soluções nodais elemento a elemento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bastante geral e aplicado a problemas estruturais e térmicos.</li> <li>• Integração de funções simples.</li> <li>• Matrizes são em banda e geralmente simétricas.</li> <li>• Resolve não-homogeneidades.</li> <li>• Tecnicamente amadurecido</li> <li>• Modelação de fronteiras e condições de fronteira complexa.</li> <li>• Não necessita de malhas estruturadas e pode misturar elementos diferentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode precisar de malhas volumétricas.</li> <li>• Obriga a uma relação integral dum princípio variacional ou de uma formulação de resíduos pesados.</li> <li>• Complexo para problemas infinitos.</li> <li>• Começa a atingir as potencialidades máximas.</li> <li>• Precisão dos resultados de gradientes ligada ao refinamento da malha.</li> </ul>

Existem atualmente no mercado uma grande diversidade de programas de simulação, sendo estes utilizados nas mais diversas áreas da engenharia. Estes programas podem ser separados em dois grupos: os “programas genéricos” e os “programas específicos”. No primeiro grupo estão presentes os programas que abordam de maneira generalista os problemas genéricos de diferentes áreas da engenharia. No segundo grupo estão presentes os programas dedicados à resolução de problemas em áreas mais específicas (Duarte 2014; Melo 2014).

### 2.6.3 Programas Numéricos de Modelação e Simulação

Os softwares genéricos são (Duarte 2014; Melo 2014):

- **ABAQUS**  
Software de análise por MEF, extensamente utilizado nos mais variados ramos da engenharia e sectores industriais. Através deste programa é possível simular problemas das mais diversas áreas da engenharia. Porém, é sobretudo conhecido pelas suas potencialidades em problemas de simulação estrutural.
- **ANSYS**  
Programa muito utilizado na indústria automóvel, principalmente na otimização aerodinâmica e nos *crash tests*. É também muito utilizado na indústria energética, eletrónica e aeroespacial.
- **SolidWorks**  
Este programa permite a otimização estrutural de conjuntos mecânicos, a análise de escoamentos, a análise térmica de circuitos elétricos, bem como outras funcionalidades. É um programa de utilização simples e permite a fácil modelação 3D.

Os softwares específicos são (Duarte 2014; Melo 2014):

- **AutoForm e DEFORM**  
Estes softwares são muito utilizados na simulação da conformação plástica de metais, extensamente utilizados na indústria automóvel.
- **ProCAST**  
Este programa é baseado no MDF e permite simular uma grande variedade de processo de fundição: fundição em coquilha rotativa, fundição injetada, fundição em coquilha por baixa pressão, *investment casting*, entre outros. O ProCAST é uma ferramenta bastante completa, que permite a previsão de defeitos relacionados com os fenómenos de solidificação e de enchimento das peças. Este programa também permite a previsão das especificações finais de carácter metalúrgico e geométrico das peças como o tamanho de grão, propriedades mecânicas, distorções, tolerâncias dimensionais, entre outros. Este é o programa utilizado pelo INEGI como ferramenta de apoio à fundição e será utilizada na parte prática desta dissertação.
- **MoldFlow**  
Software da Autodesk muito utilizado na simulação da injeção de plásticos.
- **MAGMA<sup>5</sup>**  
É uma ferramenta de simulação que permite melhorar a qualidade do fundido, otimizar as condições do processo e reduzir os custos associados a este. Este programa permite, através da simulação de enchimento do molde e da simulação de solidificação, prever a qualidade final de uma peça vazada. É um programa que pode ser usado em todos os materiais e a todos os processos de fundição (Magma 2015).

- NOVACAST (NovaFlow&Solid 6.0)

Este software permite simular o processo de enchimento e de solidificação do processo de fundição. Este software permite prever os defeitos nas peças fundidas, ajuda a otimizar o processo de fundição através da poupança de material e em melhorias na produção de fundidos (NOVACAST 2015).

#### 2.6.4 Critério de Niyama

O critério de Niyama é o critério mais amplamente usado na fundição de metal para prever a contração do metal que advém da solidificação e que provoca porosidades nas peças (Beckermann 2009).

O critério de Niyama é definido pela seguinte equação (Beckermann 2009):

$$Ny = G/\sqrt{T}$$

Onde:

G – Gradiente de temperatura (°C/cm);

T – Taxa de arrefecimento do metal (°C.s).

Segundo Niyama et al existe um valor mínimo de  $Ny$  a partir do qual a contração do metal começa a aparecer. Este valor é um valor adimensional (Torres 2014).

Todos os *softwares* de simulação calculam o critério de Niyama como *output* padrão. As indústrias de fundição usam o Critério de Niyama para prever quais as possíveis zonas da peça em estudo que poderão ser afetadas pela contração do metal, mas apenas de forma qualitativa. Apenas é possível analisar desta forma devido ao facto de o valor mínimo de  $Ny$  ser desconhecido e ser bastante sensível a alterações das condições de vazamento e do tipo de liga. (Beckermann 2009). O critério de Niyama apenas fornece informação sobre a existência ou não de contração e não diz nada sobre a quantidade de porosidade ou contração (Beckermann 2009; Torres 2014).

## **3 PARTE EXPERIMENTAL**

---

### **3.1 Introdução**

A parte experimental relativa a esta dissertação consiste na análise e eliminação dos defeitos encontrados em peças em latão produzidas através do processo de fundição por baixa pressão pela empresa CIFIAL.

A parte experimental desta dissertação pode ser dividida em duas partes relacionadas entre si:

- Análise dos defeitos presentes nas peças;
- Projeto e simulação de um sistema de gitagem e alimentação com o intuito de eliminar os defeitos.

Neste capítulo será abordado todo o problema prático, a metodologia utilizada para desenvolver o trabalho realizado, assim como todos os cálculos realizados.

### **3.2 Identificação do Problema**

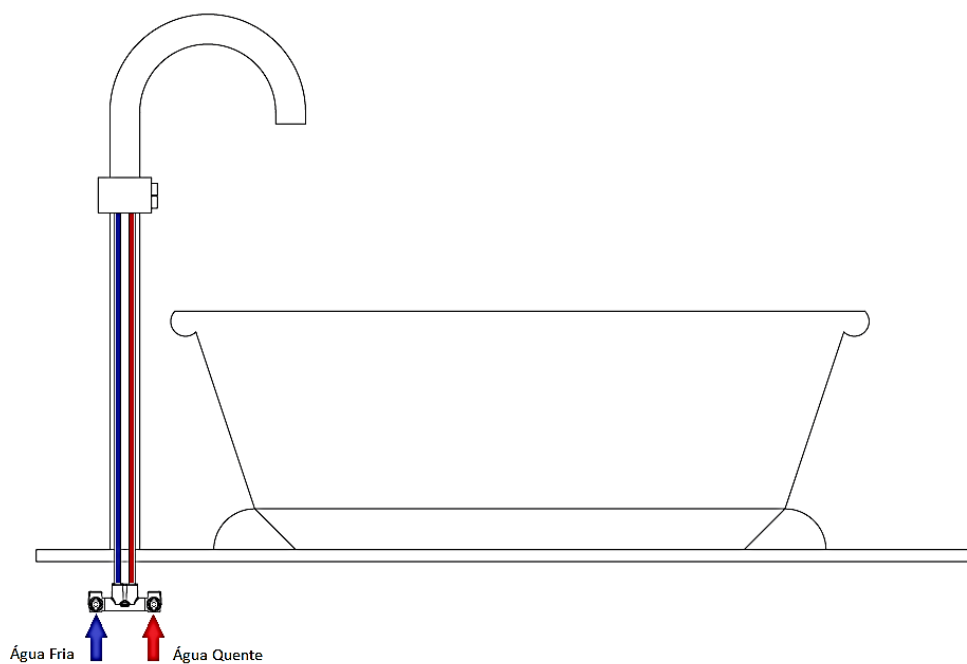
O problema abordado nesta dissertação foi apresentado pela CIFIAL ao INEGI e consistia na identificação de defeitos em peças vazadas e na proposta de correção desses defeitos. Estas, são peças em latão fabricadas através do processo de fundição por baixa pressão.

É necessário então conhecer a peça em questão. A peça em estudo está apresentada, cortada pelo plano central, na Figura 44.



*Figura 44 – Peça em estudo*

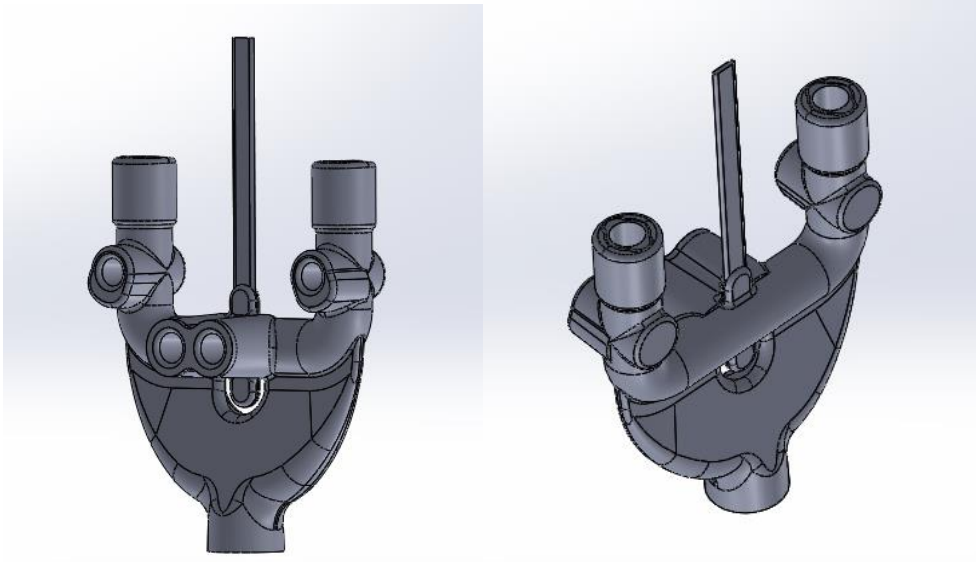
A peça é um coletor (manifold - U) parte de um conjunto de peças de um *kit* de montagem de uma das torneiras produzidas pela CIFIAL. É uma peça vazada através do processo de fundição por baixa pressão. Esta peça, que é montada no interior da parede ou no chão, tem como função fazer a ligação entre os tubos que transportam água quente e fria e o tubo principal da torneira onde depois é incluído o misturador e a saída de água. Na Figura 45 pode-se ver um esquema do posicionamento da peça na montagem.



*Figura 45 – Esquema do posicionamento do coletor na montagem da torneira*



Na Figura 46 pode-se ver o desenho CAD 3D da peça com o sistema de gitagem e alimentação tal como fornecido pela CIFIAL.



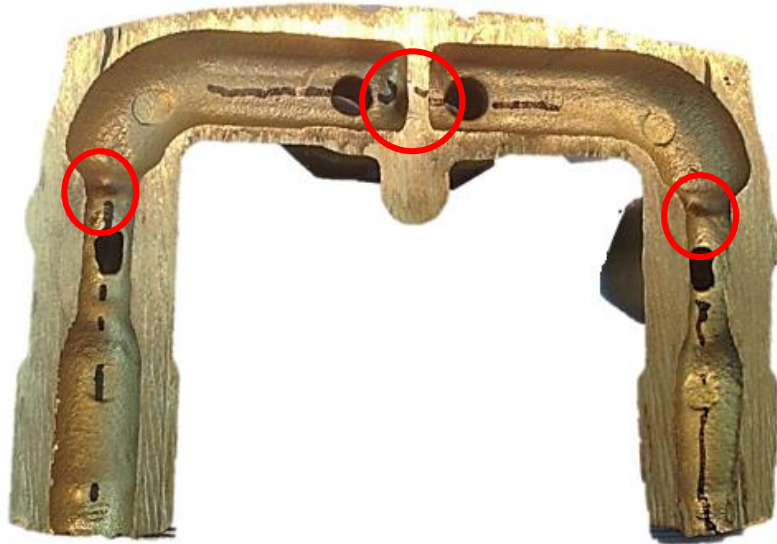
*Figura 46 – Peça Manifold-U (Peça em estudo)*

Não foi possível obter o desenho CAD 3D apenas da peça, pois não foi fornecido.

Para se perceber qual o problema e os defeitos existentes nas peças foi necessário proceder a uma análise detalhada.

### **3.3 Análise dos Defeitos da Peça**

Em primeiro lugar, realizou-se uma análise visual aos defeitos existentes. Foi possível verificar que a peça apresenta rechupes. O estudo deste tipo de defeitos, bem como as causas, modos de formação e aparência foi tratado na secção 2.2.4. Na Figura 47 estão apresentados os pontos onde foram encontrados rechupes.



*Figura 47 – Pontos de peça onde são visíveis os rechupes*

O aparecimento destes rechupes, nas zonas assinaladas podem trazer os seguintes problemas:

- Falha de estanquicidade da peça;
- Problemas e aparecimento de defeitos durante a maquinagem dos furos.

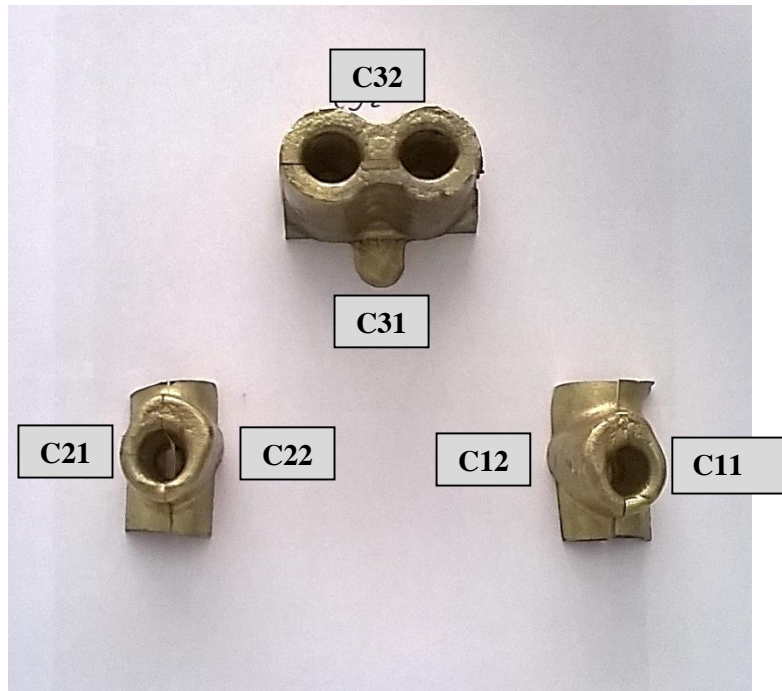
À vista desarmada não é possível perceber se estes rechupes podem ou não trazer problemas. É necessário então realizar uma análise microestrutural aos pontos onde aparecem os rechupes para se poder tirar conclusões sobre a influência destes defeitos na peça, bem como ver se existem outros defeitos no interior do coletor, pois podem existir microrechupes e estes não são visíveis a olho nu.

Para tal foi necessário cortar a peça nos pontos onde são visíveis os defeitos. Os cortes realizados são apresentados na Figura 48.



*Figura 48 – Planos de corte usados na análise da peça*

Após a realização destes cortes obtiveram-se as amostras apresentadas na Figura 49

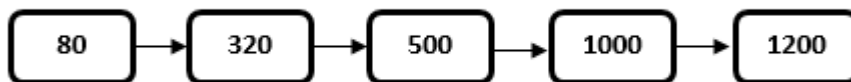


*Figura 49 – Amostras obtidas após os cortes*

Após cortar a peça foi necessário preparar as superfícies das amostras para analisar microscopicamente as suas microestruturas. O polimento das superfícies foi manual.

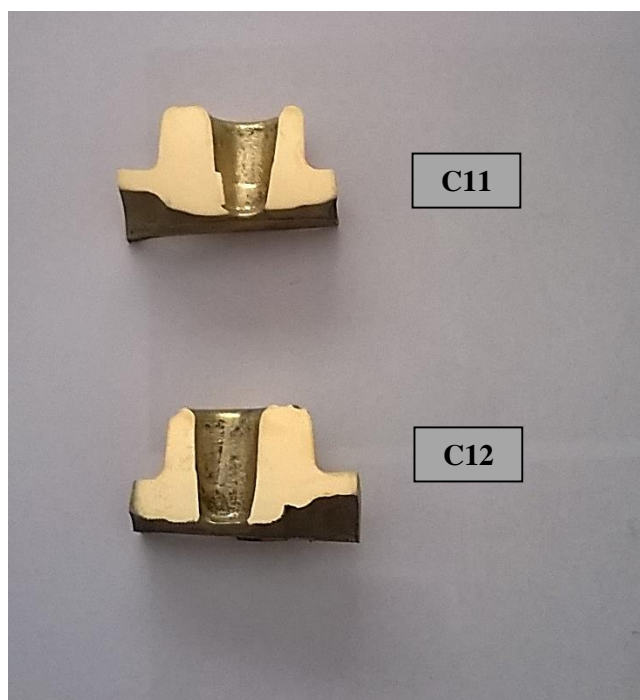
O processo de preparação e polimento usado foi o seguinte:

1. Limpeza – Colocação das peças numa tina de ultrassons durante 5 minutos.
2. Desbaste com lixas de diferentes granulometrias – Foi-se diminuindo a granulometria da lixa pela seguinte sequência:

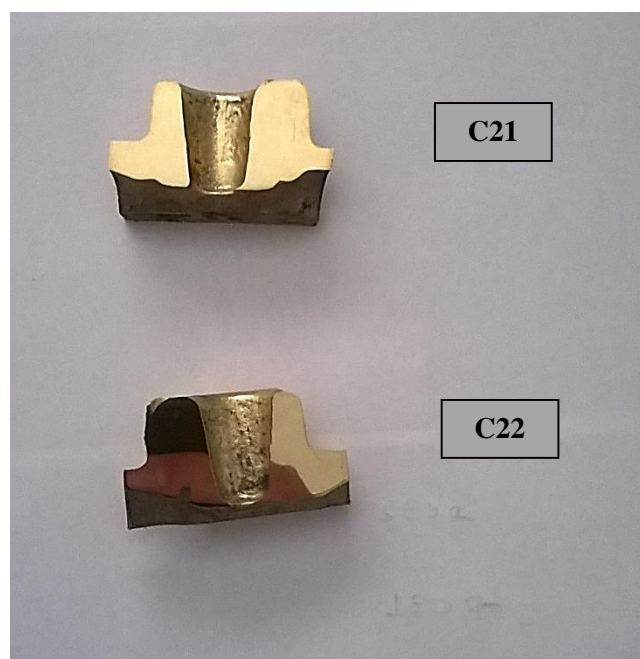


3. Polimento – O polimento foi realizado com pano abrasivo de diamante começando com uma granulometria de 3  $\mu\text{m}$  e posteriormente com 1  $\mu\text{m}$ .

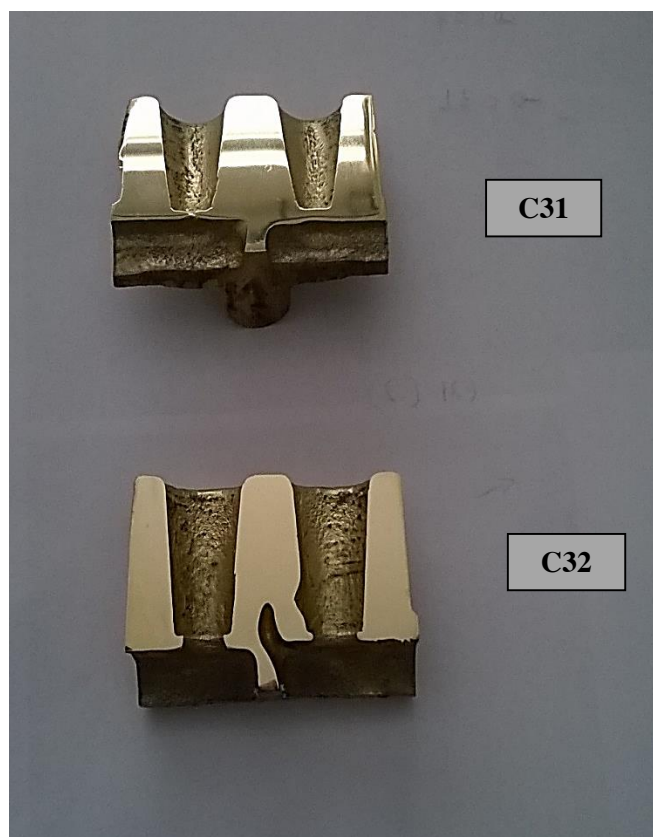
Nas Figuras 50, 51 e 52 estão apresentadas as superfícies das amostras a analisar após o polimento.



*Figura 50 – Amostras C11 e C12*



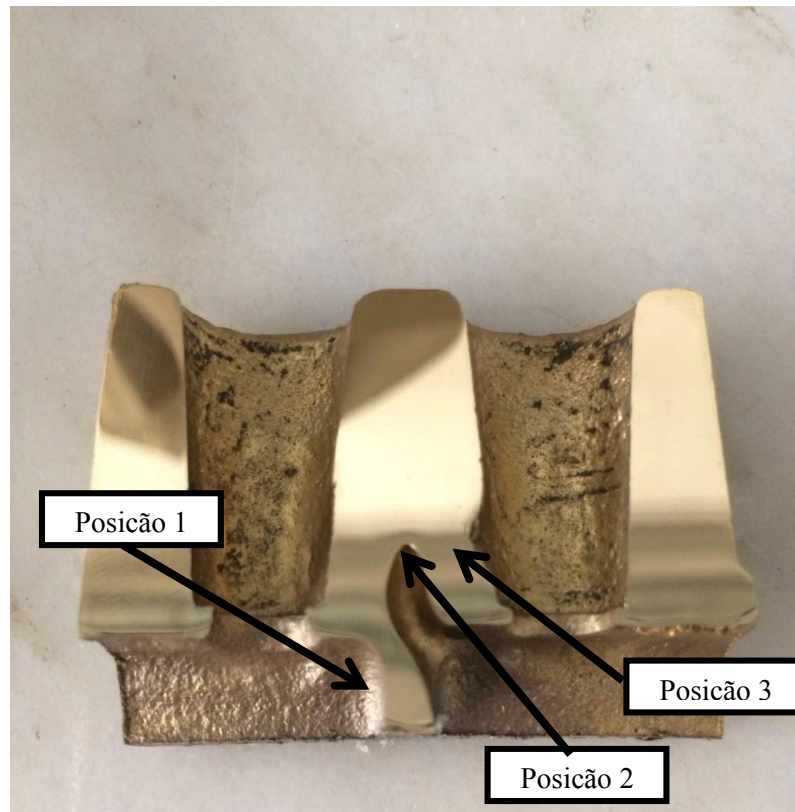
*Figura 51 – Amostras C21 e C22*



*Figura 52 – Amostras C31 e C32*

Depois de realizado todo o processo de preparação e polimento das superfícies das amostras a analisar foi possível obter as imagens das microestruturas.

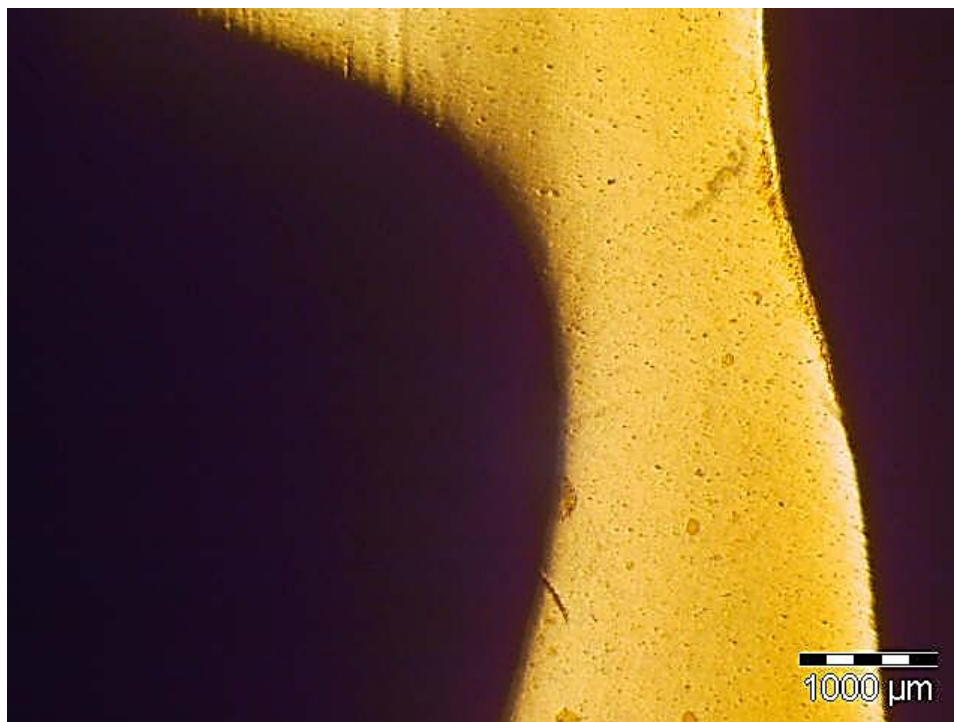
Começando pela amostra C32, visto que é a amostra que apresenta um rechupe de maior dimensão, foram analisadas as microestruturas em três posições diferentes. As posições analisadas estão apresentadas na Figura 53.



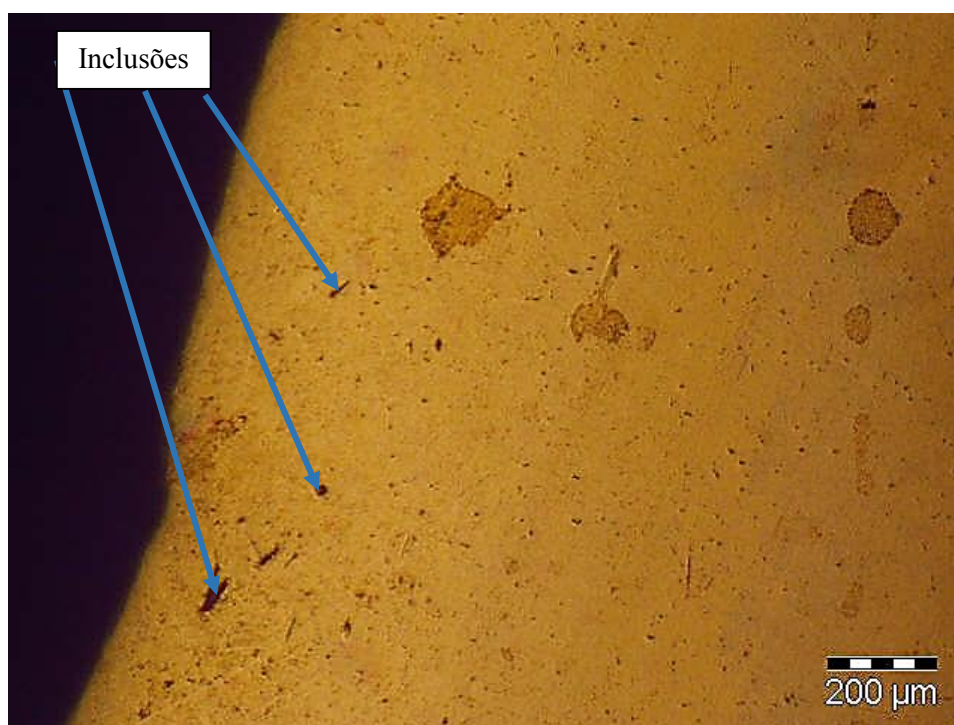
*Figura 53 – Posições analisadas na amostra C32*

As imagens das microestruturas obtidas na posição 1 estão apresentadas nas Figuras 54 e 55.





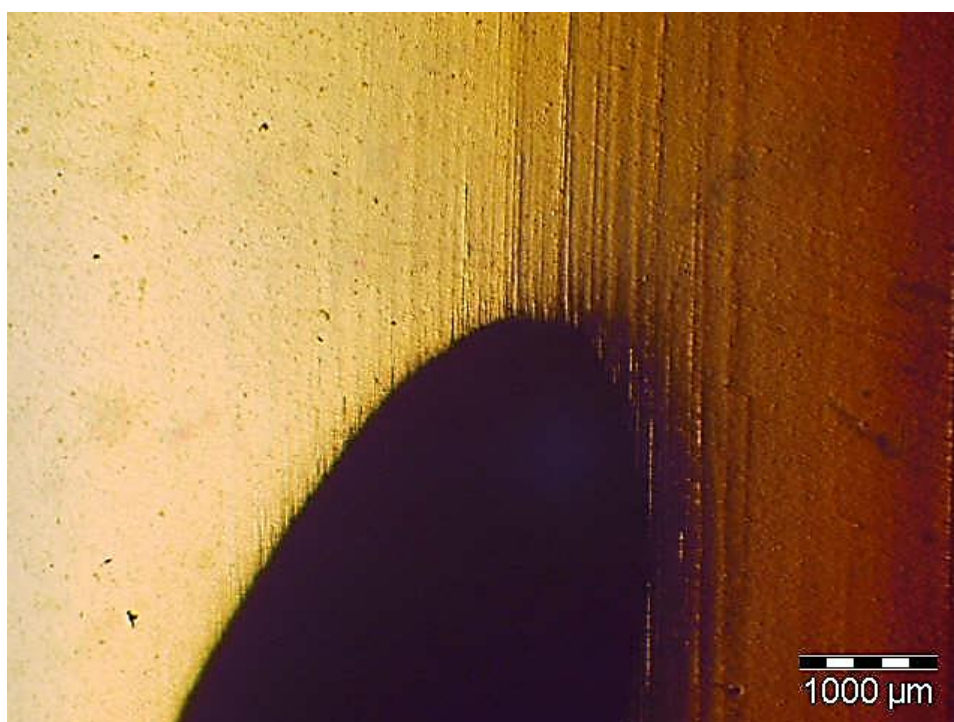
*Figura 54 – Amostra C32 – Posição 1 – 1000 μm*



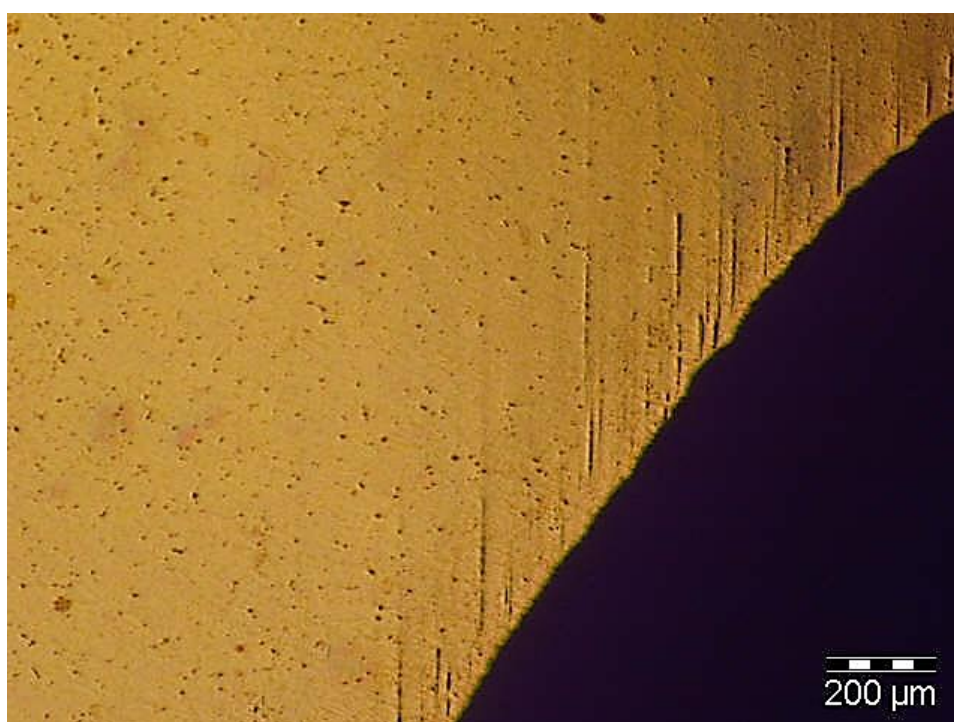
*Figura 55 – Amostra C32 – Posição 1 – 200 μm*

Analizando as Figuras 54 e 55 pode-se dizer que a amostra C32, na posição 1, microestruturalmente, não apresenta defeitos graves. É possível verificar que a peça, nesta posição não apresenta fuga devido a microrechupes ou porosidades pois são inexistentes. É possível ver que a peça contém algumas inclusões mas não são graves para o funcionamento correto da peça.

As imagens das microestruturas obtidas na posição 2 estão apresentadas nas Figuras 56 e 57.



*Figura 56 – Amostra C32 – Posição 2 – 1000 μm*



*Figura 57 – Amostra C32 – Posição 2 – 200 μm*

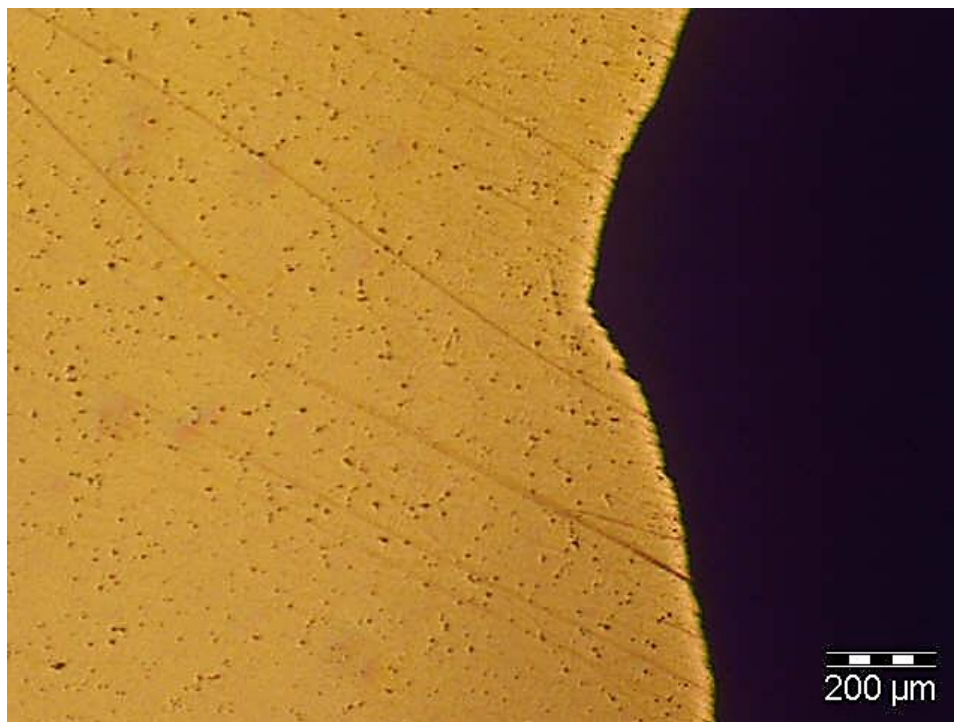


Analisando as Figura 56 e 57 é possível verificar, na posição 2, microestruturalmente, a amostra C32 também não apresenta defeitos graves. Pode-se ver que a peça, nesta posição, não contém microrechupes ou porosidades, apenas algumas inclusões que em nada interferem com o funcionamento correto da peça.

As imagens das microestruturas obtidas na posição 3 estão apresentadas nas Figuras 58 e 59.



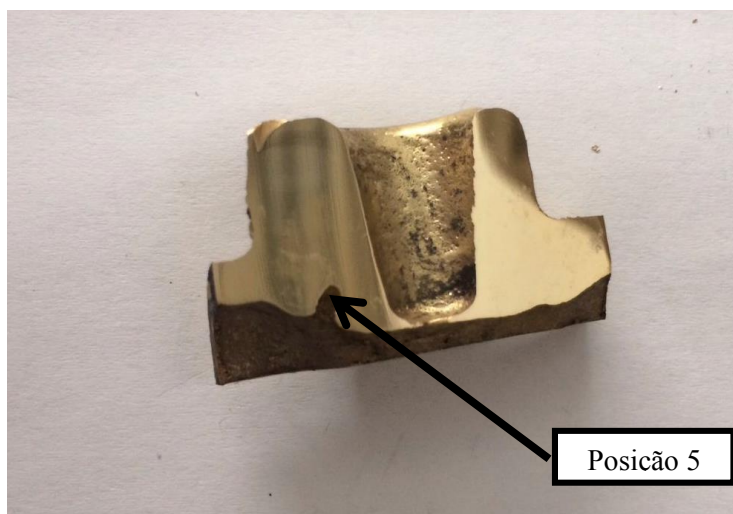
*Figura 58 – Amostra C32 – Posição 3 – 1000 μm*



*Figura 59 – Amostra C32 – Posição 3 – 200 μm*

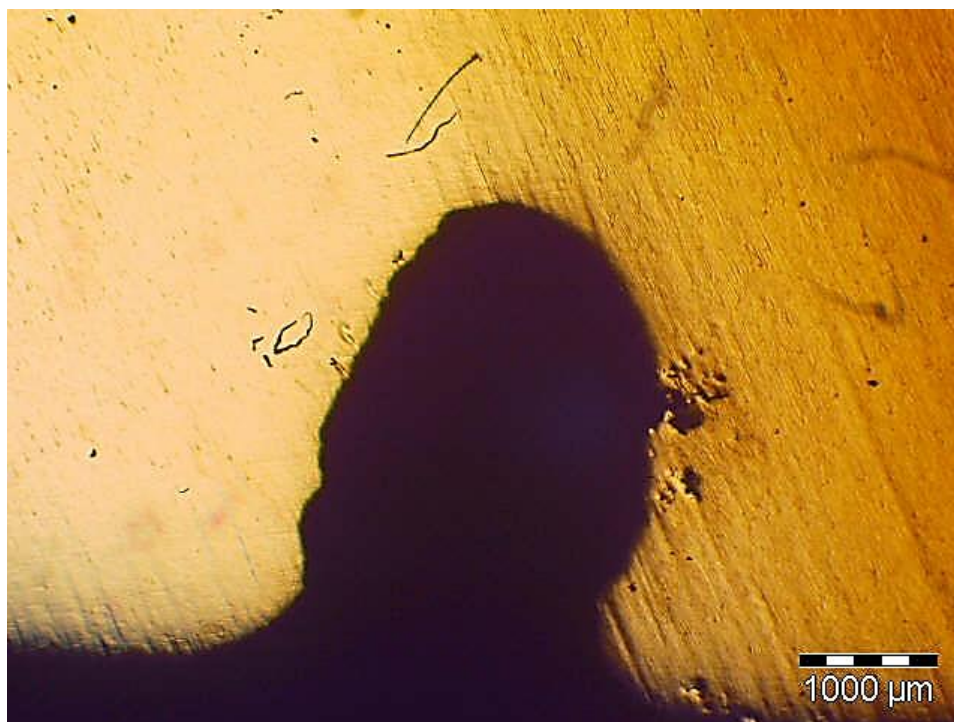
Da análise das Figuras 58 e 59 é possível verificar que a amostra C32, na posição 3, microestruturalmente, tal como na posição 1 e 2, não apresenta defeitos que prejudiquem o correto funcionamento da peça.

De seguida foi analisada a amostra C22 pois é a amostra que, seguidamente à C32 é a que apresenta um maior rechupe e está localizado numa zona que será posteriormente maquinada e é necessário perceber se a sua forma e localização é prejudicial ao correto funcionamento da peça. A posição onde foi analisada a amostra está apresentada na Figura 60.

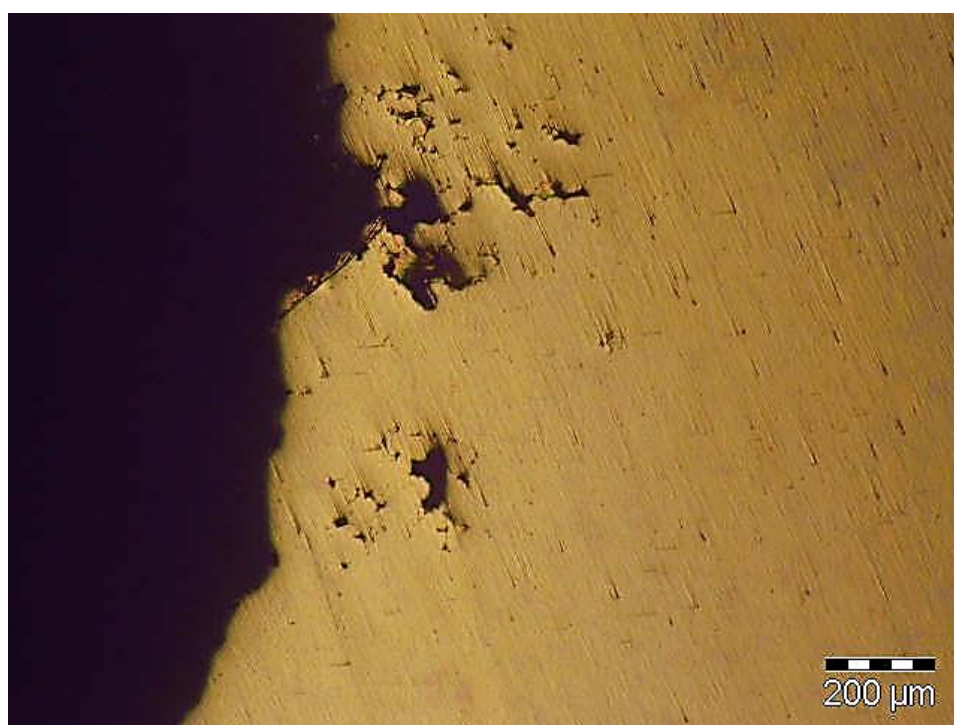


*Figura 60 – Posições analisadas na amostra C22*

As imagens das microestruturas obtidas na posição 5 estão apresentadas nas Figuras 61, 62 e 63.

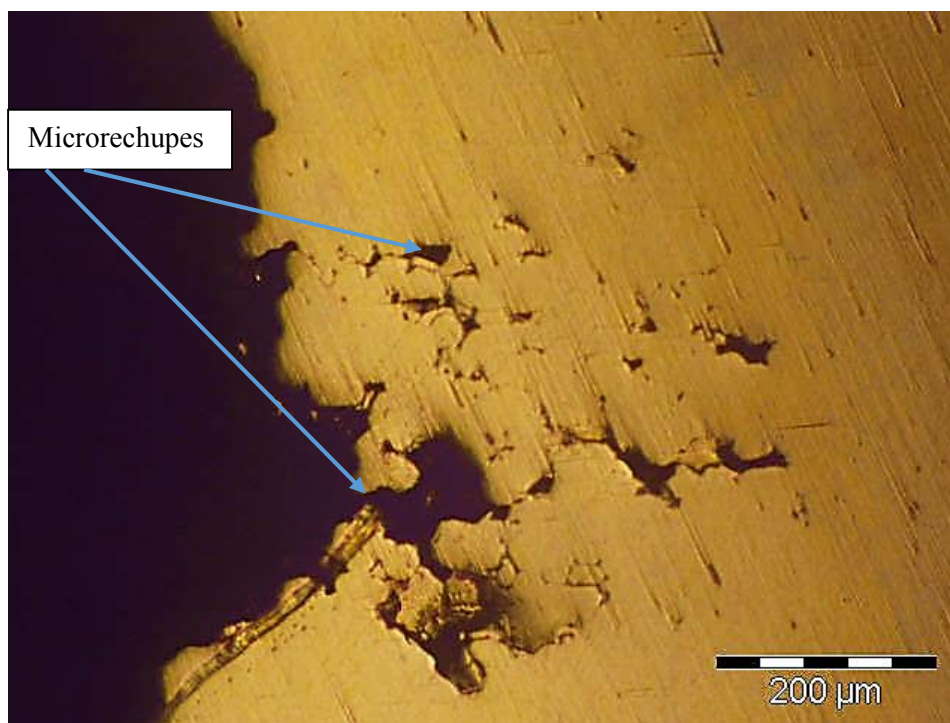


*Figura 61 – Amostra C22 – Posição 5 – 1000 μm*



*Figura 62 – Amostra C22 – Posição 5 – 200 μm*





*Figura 63 - Amostra C22 – Posição 5 – 200 µm*

Analisando as Figuras 61, 62 e 63 é possível verificar que a amostra C22, microestruturalmente apresenta microrechupes. Este defeito poderia originar fuga mas a posição do microrechupe não é crítica em termos de fuga.

As amostras C32 e C22 foram as amostras que apresentavam rechupes de maior dimensão e por isso foram as primeiras a ser analisadas. No entanto, foram analisadas também as amostras C31 e C12, sendo que essa análise está apresentada no ANEXO A. Os defeitos presentes nas peças, segundo a Secção 2.2.4 (pág 23), rechupes e microrechupes ou porosidades.

É possível então concluir, através da análise das microestruturas, que a peça não apresenta problemas graves que condicionem o seu funcionamento.

No entanto, apenas foi disponibilizada pela CIFIAL uma peça (Manifold-U) para análise, e os defeitos encontrados nesta peça podem não ser lineares em todas as peças produzidas. Para isso seria necessário analisar mais peças, aumentando assim o número de amostras, permitindo retirar conclusões mais rigorosas.

Relativamente à localização do rechupes foi necessário perceber se haveria problemas na fase de maquinagem da peça. Para tal fez-se uma análise à localização dos rechupes nas amostras C32, C22 e C12 pois eram as amostras que continham os rechupes visíveis e maiores nas secções analisadas, tendo eles as seguintes dimensões, no plano da secção:

- Amostra C32 – Aproximadamente 12 mm de altura e 4 mm de largura;
- Amostra C22 – Aproximadamente 4 mm de altura e 4 mm de largura;
- Amostra C12 – Aproximadamente 3 mm de altura e 3 mm de largura.

O desenho 2D da parte da peça correspondente à amostra C32 está apresentada na Figura 64:

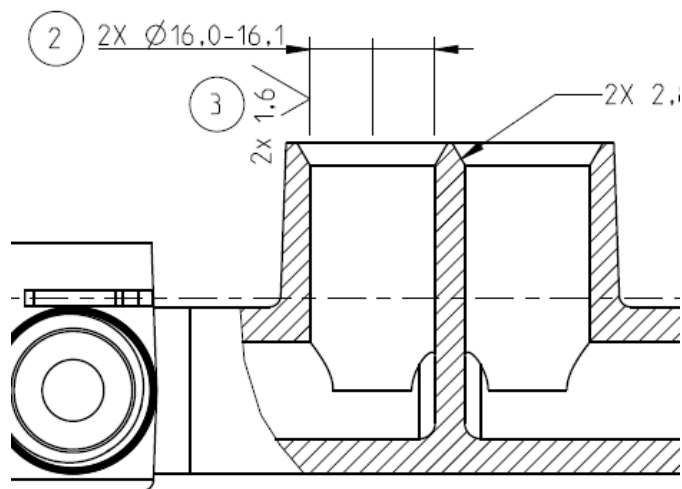


Figura 64 – Parte do desenho 2D da peça correspondente à posição da secção da peça C32

A dimensão e a posição dos furos a realizar na amostra C32 são apresentadas na Figura 65.

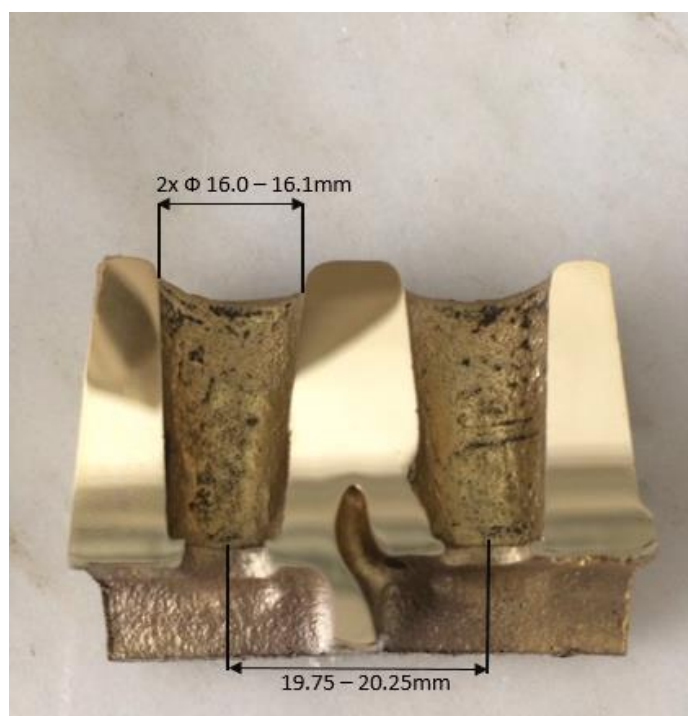


Figura 65 – Diâmetros e posição dos furos a efetuar na amostra C32

As medições da localização dos rechupes relativamente às linhas de centro dos furos são apresentadas na Figura 66.

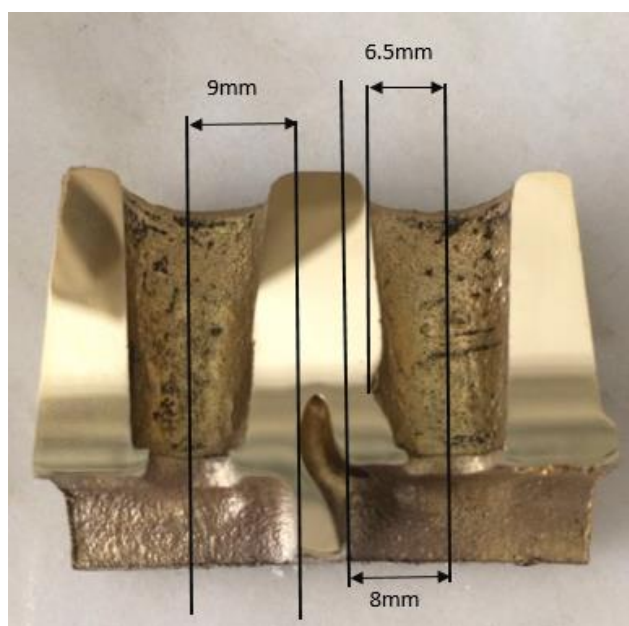


Figura 66 – Posição dos rechupes relativamente à linha de centro dos furos (Amostra C32)

O desenho 2D da parte da peça correspondente à amostra C22 e C12 está apresentado na Figura 67.

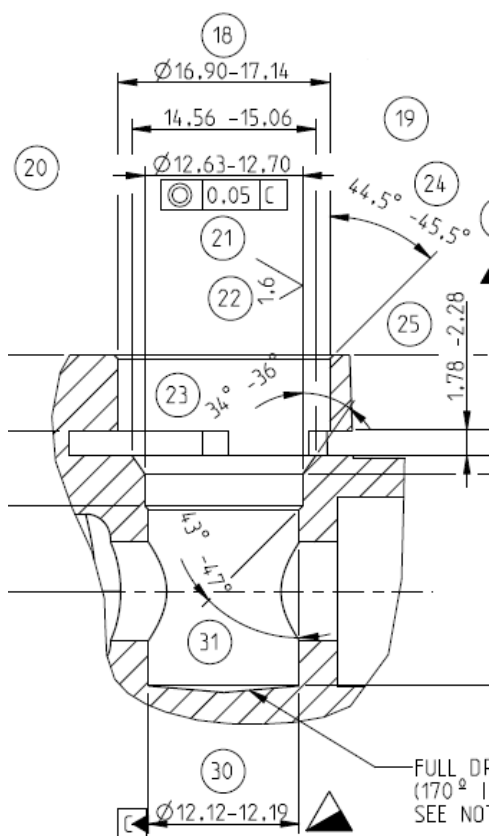
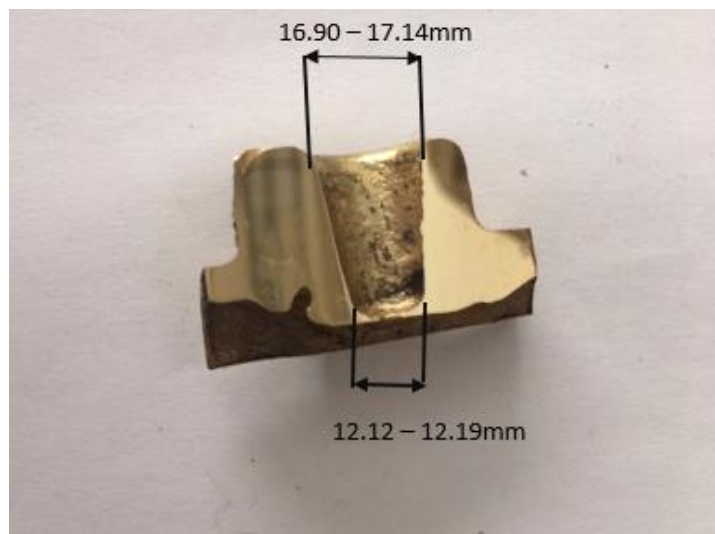


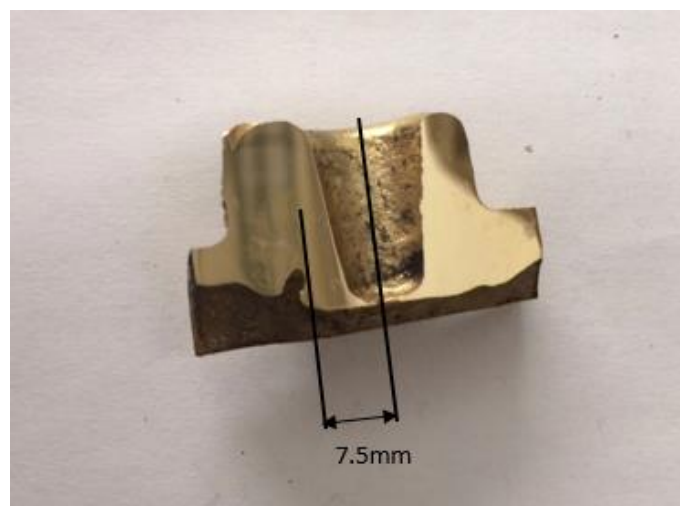
Figura 67 – Parte do desenho 2D da peça correspondente à posição da secção da peça C22 e C12

As medidas dos furos a realizar na amostra C22 são apresentadas na Figura 68.



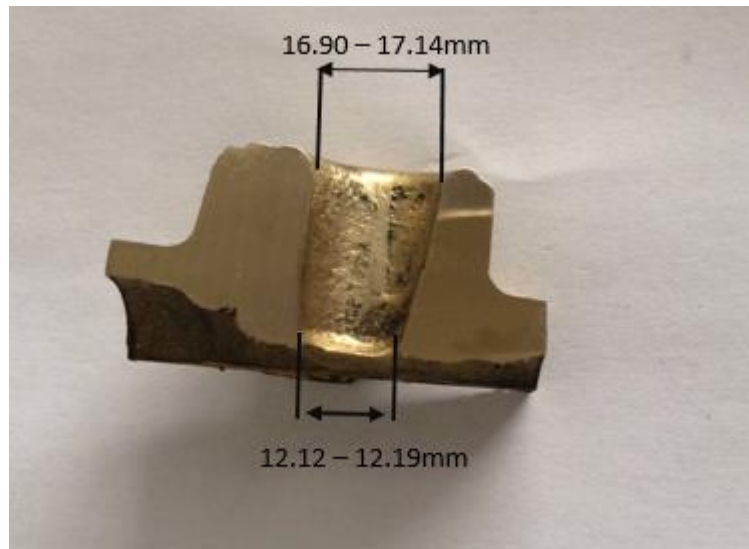
*Figura 68 – Diâmetro e posição dos furos a realizar na amostra C22*

As medições da localização dos rechupes relativamente às linhas de centro do furo são apresentadas na Figura 69



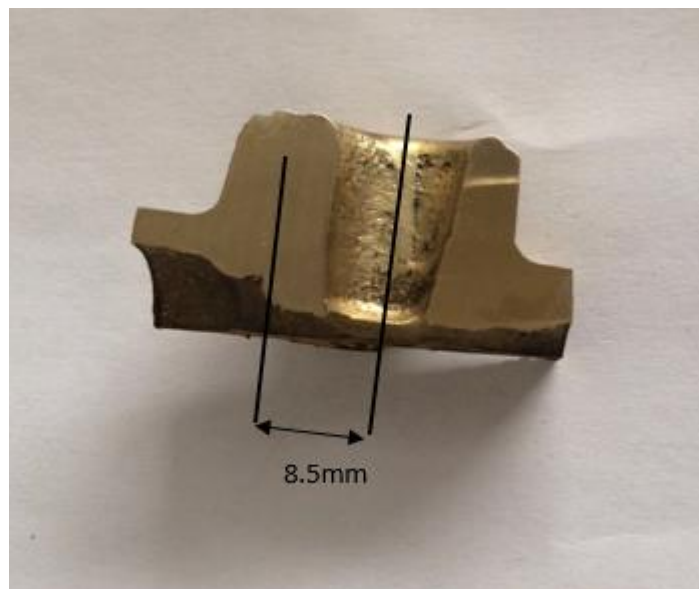
*Figura 69 – Posição dos rechupes relativamente à linha de centro dos furos (Amostra C22)*

As medidas dos furos a realizar na amostra C12 são apresentadas na Figura 70.



*Figura 70 – Diâmetro e posição dos furos a realizar na amostra C12.*

As medições da localização dos rechupes relativamente às linhas de centro do furo são apresentadas na Figura 71.



*Figura 71 – Posição dos rechupes relativamente à linha de centro dos furos (Amostra C12)*

Pode-se então concluir que a posição dos rechupes na amostra C22 e C12 não influencia o correto funcionamento da peça nem cria problemas na maquinagem pois o raio do furo a maquinar é menor que a distância do rechupe à linha de centro do furo. No entanto, na amostra C32 é possível verificar nas Figuras 65 e 66, para que não haja problemas na maquinagem, o raio do furo a realizar deverá ser maior que a distância do rechupe existente na posição 3 à linha de centro do furo e menor que a distância do rechupe existente na posição 2 à linha de centro do furo. Tendo



isso em conta, o diâmetro mínimo do furo deveria ser de 13 mm e o diâmetro máximo do furo deveria ser de 16 mm. Como o furo a realizar tem como diâmetro 16.0 mm-16.1 mm, pode-se concluir que o posicionamento do rechupe situado na posição 2 vai gerar problemas na maquinagem.

Porém, apesar de a análise dos defeitos da peça não encontrar defeitos graves que provoquem problemas de estanquicidade pôde-se verificar que o rechupe encontrado na amostra C32 pode provocar problemas na maquinagem e isso pode levar a um grande aumento da quantidade de peças rejeitadas.

É necessário então encontrar uma solução que permita a redução ou mesmo eliminação dos rechupes.

### **3.4 Simulações de Solidificação**

As simulações de solidificação presentes nesta dissertação foram realizadas pela Dra. Nannam Song que utilizou o programa de simulação ProCAST.

As etapas do processo são as seguintes:

1. Criação da Malha
  - a. Importação do ficheiro CAD através de um ficheiro do tipo .IGS;
  - b. Criação de uma malha 2D nas superfícies
  - c. Criação de uma malha 3D tetraédrica
2. Definição do modelo para simulação
  - a. Materiais e temperaturas
  - b. Condições de fronteira
3. Definição dos parâmetros do processo
4. Simulação do modelo

A liga utilizada nas simulações de solidificação da peça foi a liga usada na CIFIAL. É uma liga com um teor de chumbo muito baixo e com adição de bismuto. Na Tabela 37 está apresentada a composição química da liga.

Tabela 37 – Composição química da liga de cobre usada na CIFIAL (CuZnBi)

Elemento	Composição Química
<b>Alumínio</b>	0.6
<b>Bismuto</b>	0.7
<b>Ferro</b>	0.15
<b>Manganês</b>	0.03
<b>Níquel</b>	0.1
<b>Chumbo</b>	0.1
<b>Silício</b>	0.05
<b>Estanho</b>	0.2
<b>Zinco</b>	37
<b>Cobre</b>	Restante

No ANEXO B são apresentadas mais algumas propriedades relevantes da liga e da areia de sílica usada nos machos.

Relativamente ao material usado na coquilha, como foi referido na secção 2.4.1, são usadas coquilhas em cobre-berílio. No entanto, visto que esta é uma fase de projeto onde as soluções são encontradas através de iterações, as alterações na coquilha serão inúmeras e nesta fase a empresa usa uma coquilha em aço ao carbono de construção C45E pois é um material bem mais barato que o cobre berílio (CuBe2), sendo que o preço do cobre berílio varia entre 20,7 e 22,8 €/Kg (CES Edupack 2015) e o preço do aço C45E (Ck45) é de 2,99 €/Kg (Valor obtido através da empresa FRamada). Por isso, todas as simulações serão realizadas usando como material para a coquilha o aço C45E (Ck45) pois é o aço que a empresa usa na construção das coquilhas na fase de testes.

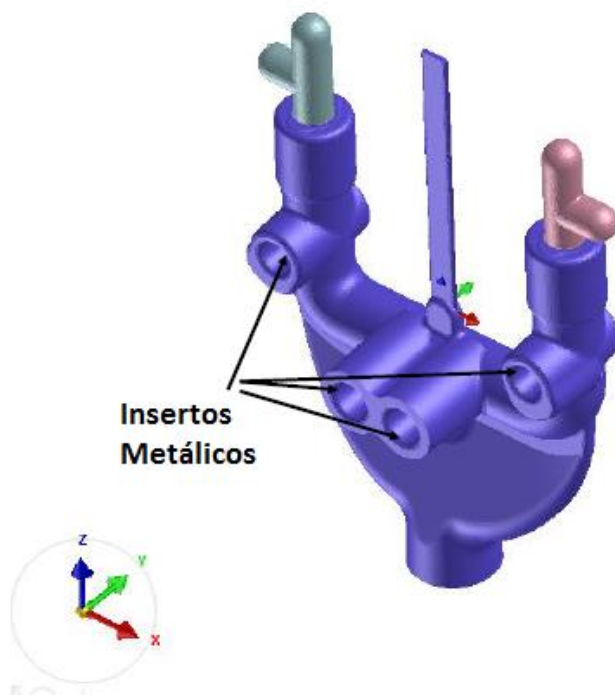
A composição química do aço usado na simulação está apresentada no ANEXO B.

O uso deste aço na simulação não influencia a validade dos resultados pois devido às propriedades e características do cobre-berílio comparando com o aço (como referido na secção 2.4.1), se os resultados forem bons usando uma coquilha em aço, em cobre berílio serão ainda melhores pois a condutividade térmica do cobre-berílio é bastante maior que a condutividade térmica do aço. A condutividade térmica dos dois materiais são as seguintes:

- Cobre-Berílio (CuBe2) – 88,3 a 102 W/mK (CES Edupack 2015)
- Aço C45E (Ck45) – 50 W/mK (Lucefin 2015)

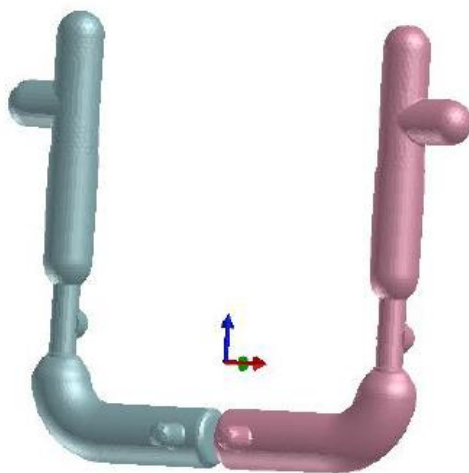
### 3.4.1 Simulação de Solidificação 1 (Comparação entre Software e Peça Real)

A simulação de solidificação 1 é referente ao sistema de gitagem e alimentação apresentado na Figura 72.



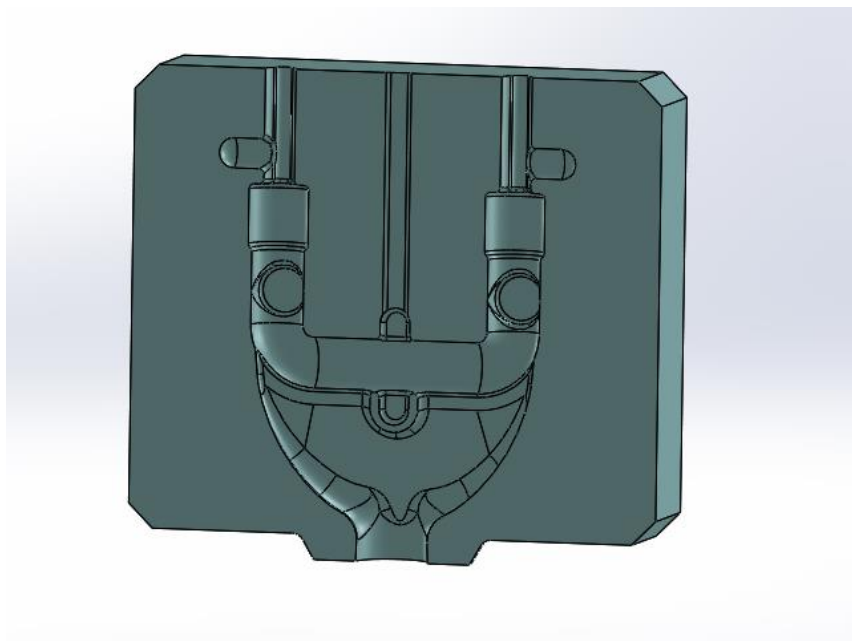
*Figura 72 – Sistema de gitagem e alimentação usado na simulação de solidificação 1*

O macho de areia utilizado para criar a cavidade interior da peça usado nesta simulação está apresentado na Figura 73.



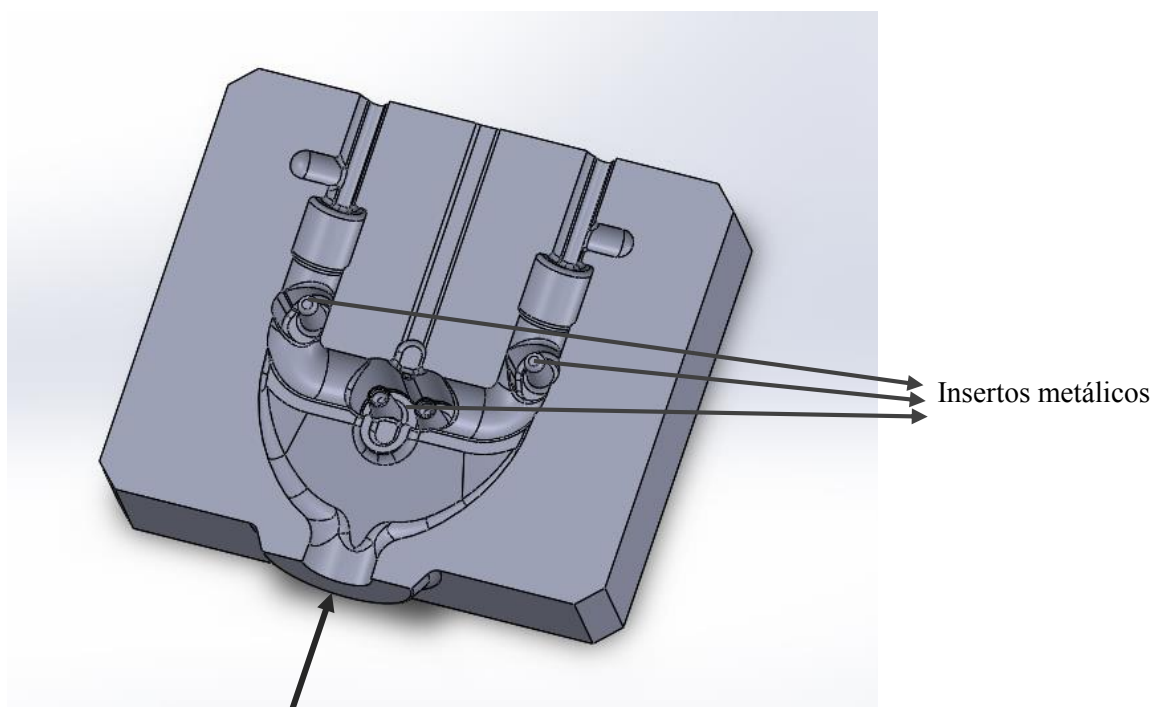
*Figura 73 – Macho de areia interior usado na simulação de solidificação 1*

A parte direita da coquilha está apresentada na Figura 74.



*Figura 74 – Parte direita da coquilha*

A parte esquerda da coquilha incluindo os insertos metálicos que irão moldar os furos da peça está apresentada na Figura 75, bem como o sentido de enchimento do metal.



*Figura 75 – Parte esquerda da coquilha incluindo os insertos metálicos. Enchimento realizado no sentido demonstrado pela seta*

Esta coquilha foi usada como base em todas as simulações realizadas sendo que foi sofrendo alterações à medida que a configuração do sistema de alimentação ia sendo alterado.

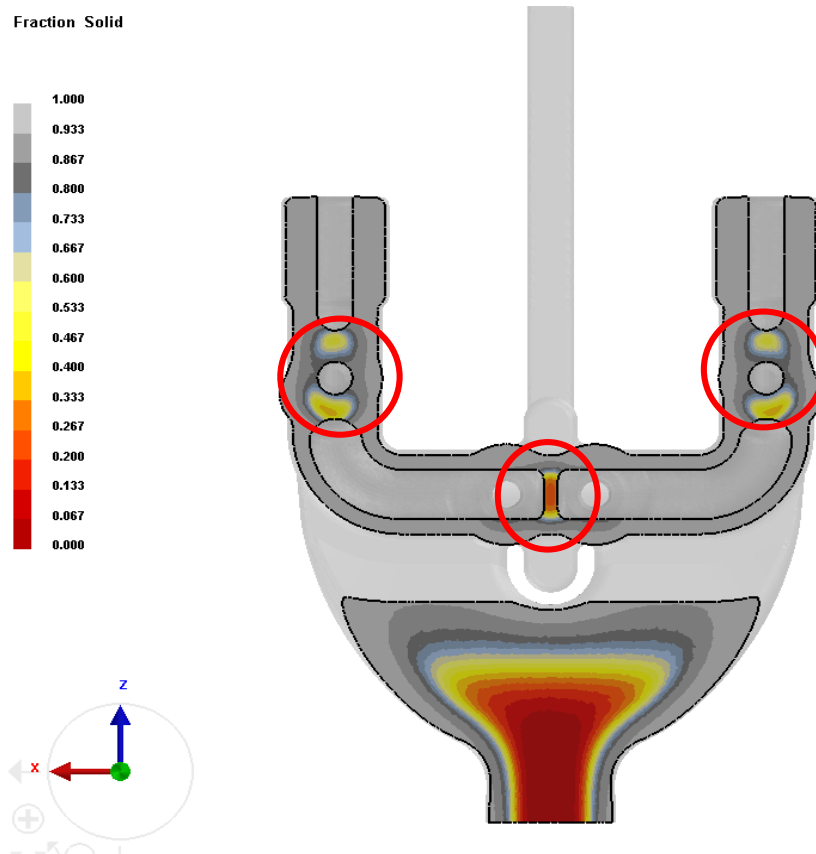
As condições iniciais e de fronteira utilizadas nesta simulação estão apresentadas Tabela 38.

*Tabela 38 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 1*

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	C45E (Ck45)	170
Macho	Areia de Sílica	120
Manifold-U	CuZnBi	950
<b>Pressão: 0.56 bar</b>		
<b>Arrefecimento a Ar</b>		

Após a simulação obteve-se o modelo de solidificação da peça. Foram efetuados cortes de forma a obter as vistas de secção das zonas que apresentavam defeitos para que seja possível estudar essas zonas.

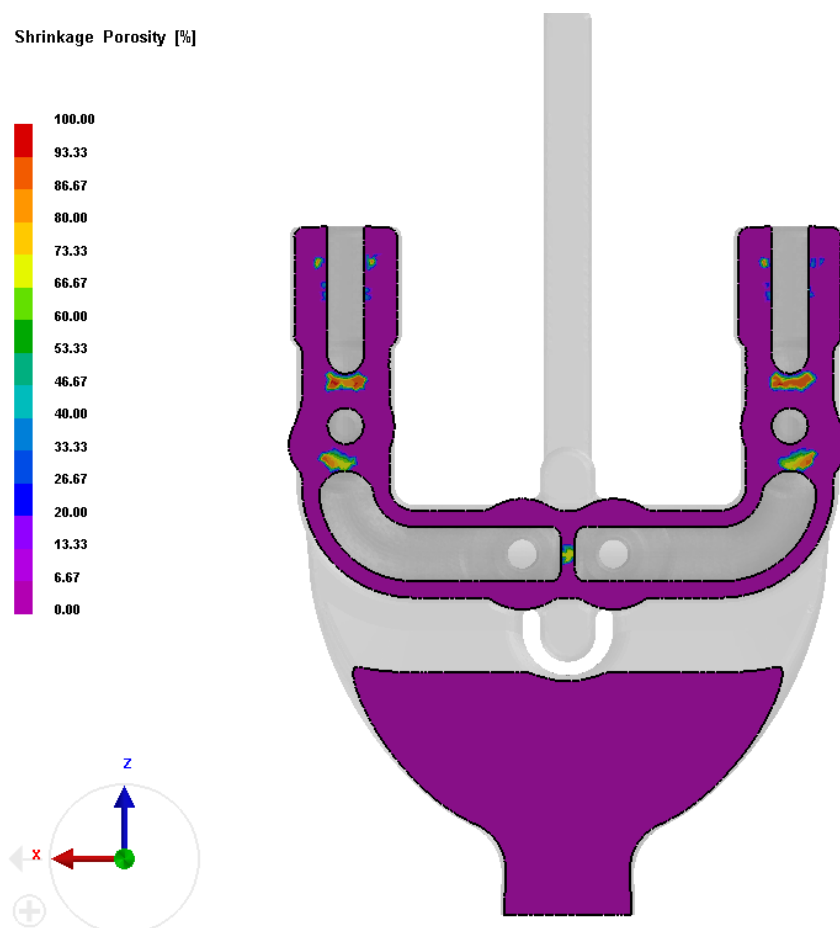
Nas Figura 76 está apresentada a distribuição da fração sólida do corte pelo plano XZ central da peça onde é possível analisar os locais mais propícios a aparecer rechupes.



*Figura 76 – Distribuição da fração sólida no plano XZ central (Simulação 1)*

Na Figura 76 pode-se concluir que os pontos assinalados são os últimos pontos a solidificar, ou seja, onde a fração sólida é menor e por isso são os pontos da peça com maior tendência ao aparecimento de defeitos, nomeadamente rechupes.

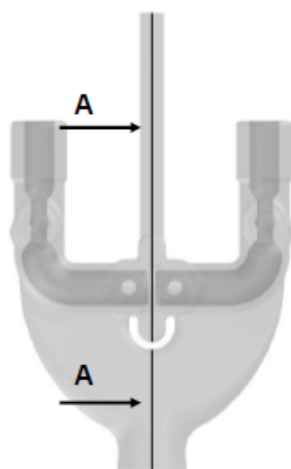
Isso é possível verificar na Figura 77, onde são apresentados os resultados da simulação para a mesma secção, mas desta vez apresentando os pontos onde ocorrem os rechupes de solidificação, ou seja, “Shrinkage Porosity”.



*Figura 77 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 1)*

Como se pode verificar na Figura 77 os rechupes aparecem exactamente na mesma posição onde a fração sólida é menor.

Para melhor perceber qual a forma e dimensão do rechupe foi necessário sectionar a peça pelo plano apresentado na Figura 78.



*Figura 78 – Corte A-A*

Os gráficos da distribuição da fração sólida e da distribuição dos rechupes na secção A-A da peça são apresentados na Figura 79.

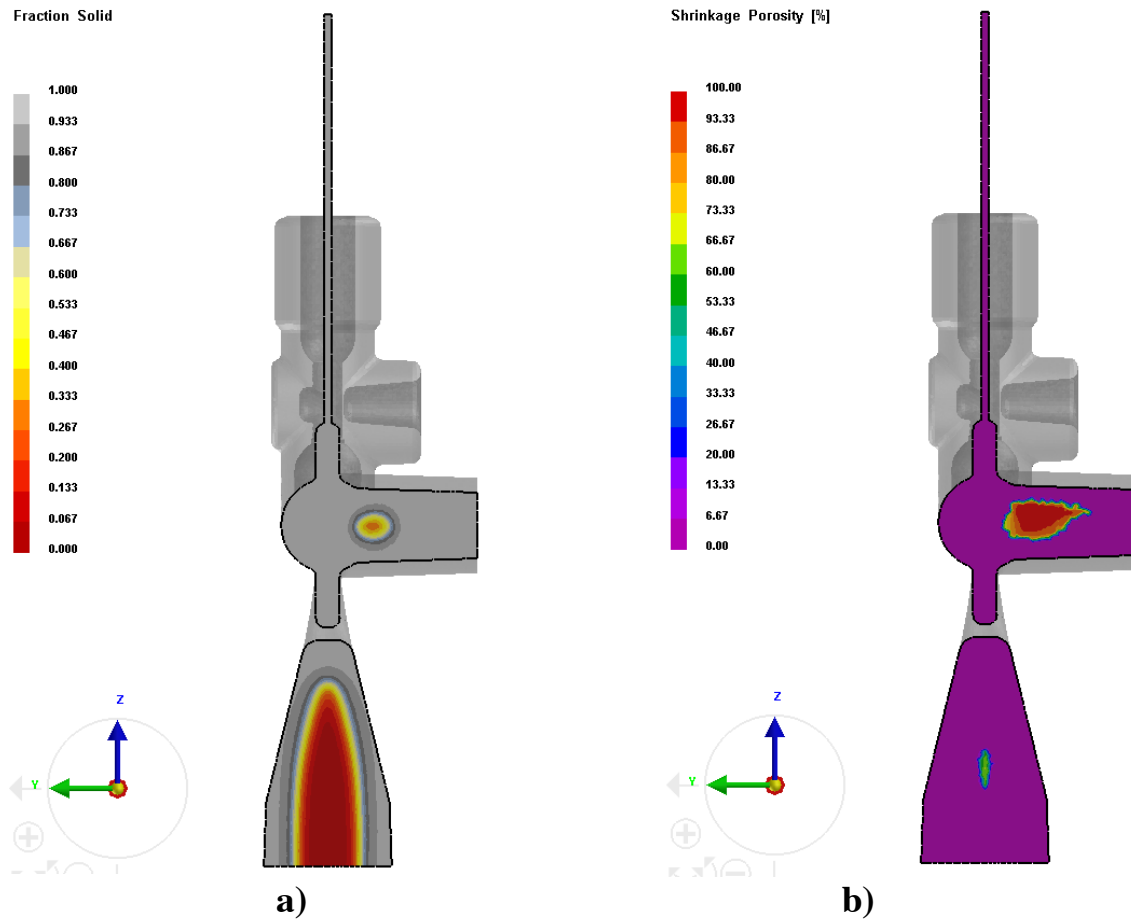


Figura 79 – (a) - Distribuição da fração sólida do corte A-A; (b)- Distribuição dos rechupes no corte A-A (à direita); (Simulação 1)

De forma a analisar os rechupes existentes nas laterais da peça foi necessário seccionar a peça pelo plano apresentado na Figura 80.



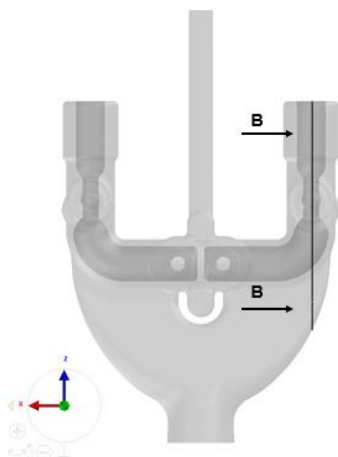


Figura 80 – Corte B-B

Os gráficos da distribuição dos rechupes e dos microrechupes na secção B-B da peça são apresentados na Figura 81.

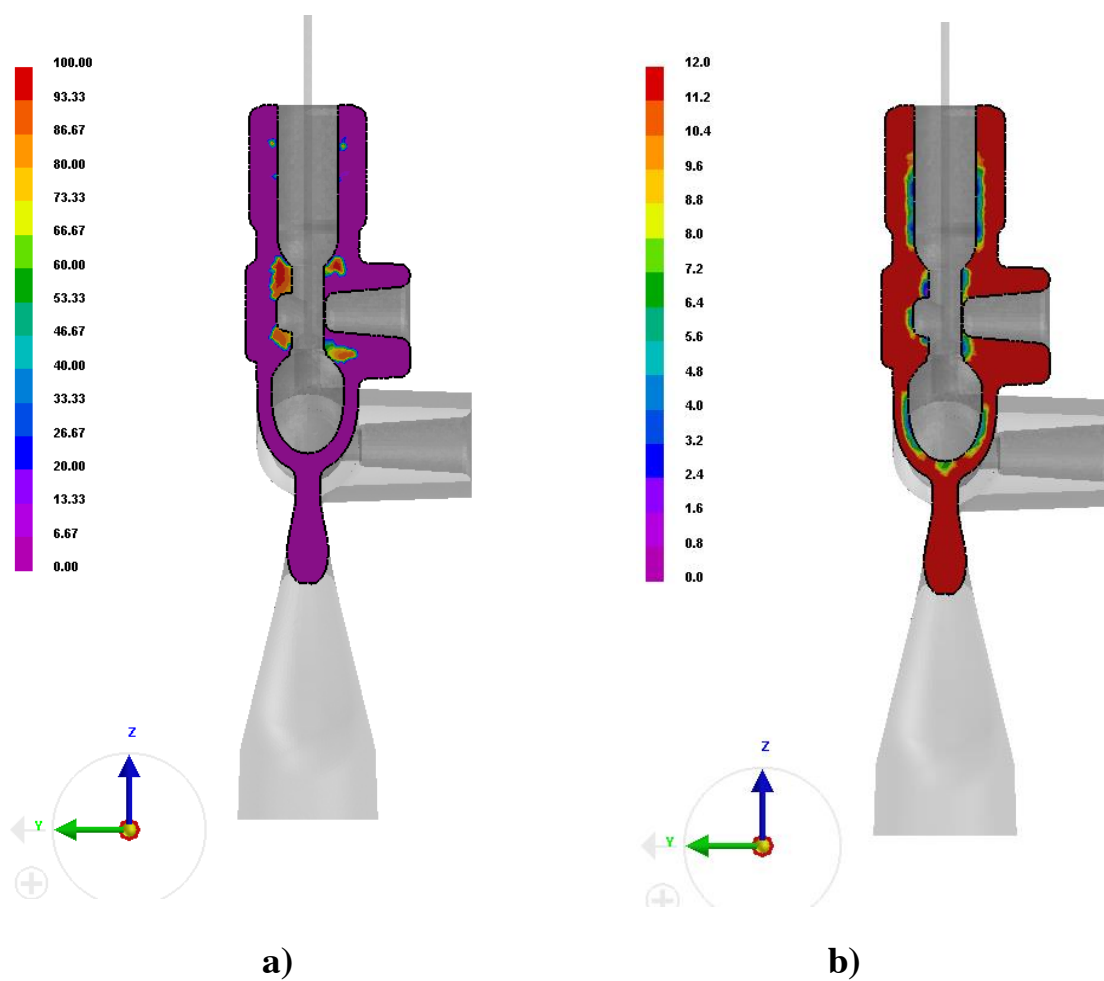
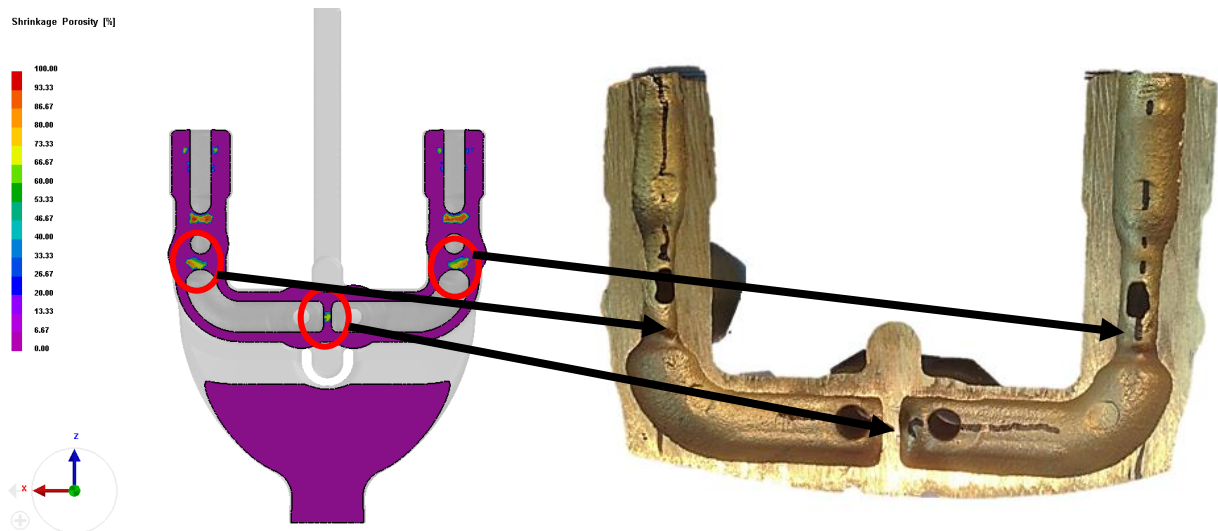


Figura 81 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte B-B;(b)-Distribuição dos microrechupes no corte B-B (à direita); (Simulação 1)

Comparando os resultados da simulação com a peça, analisada na secção 3.3 pode-se concluir que a simulação previu com bastante rigor os pontos da peça onde apareceriam rechupes.

Na Figura 82 pode-se ver uma comparação entre os resultados obtidos na simulação com a peça vazada na CIFIAL.



*Figura 82 – Comparação entre os resultados da simulação de solidificação 1 com a peça real*

### 3.4.2 Simulação de Solidificação 2 (Alteração dos Insertos Metálicos)

Como se pode verificar nos resultados da simulação de solidificação 1, a peça apresenta diversos problemas de rechupes. É necessário então pensar na forma de eliminar ou fazer com que esses rechupes apareçam em zonas que não prejudiquem o correto funcionamento da peça.

Na tentativa de eliminar ou alterar a posição do rechupe central da peça, optou-se por substituir os insertos metálicos utilizados para criar as cavidades dos furos por machos de areia. Com esta simulação pretende-se perceber qual a influência da alteração do material dos machos na formação dos rechupes na zona afetada. Esta é uma iteração na tentativa de resolver o problema. Na Figura 83 pode-se ver quais os insertos metálicos que foram substituídos por machos de areia.

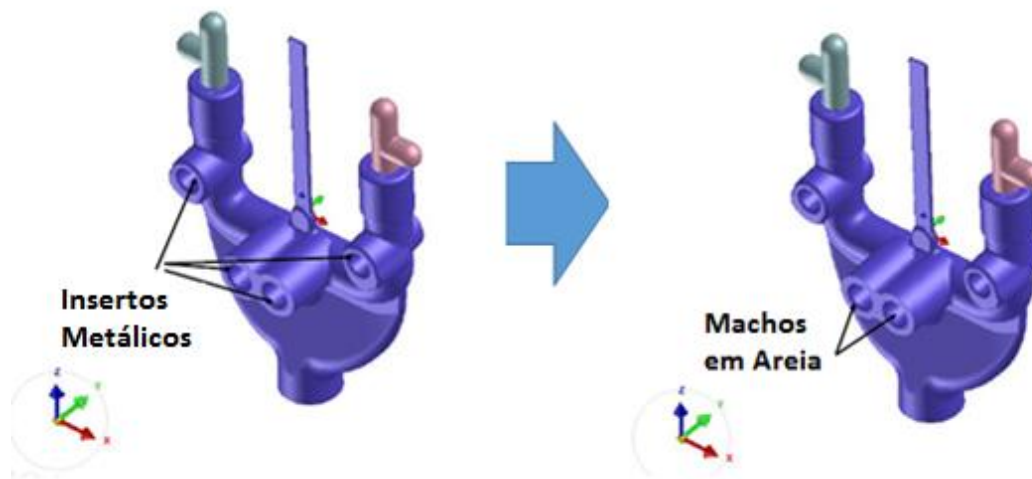


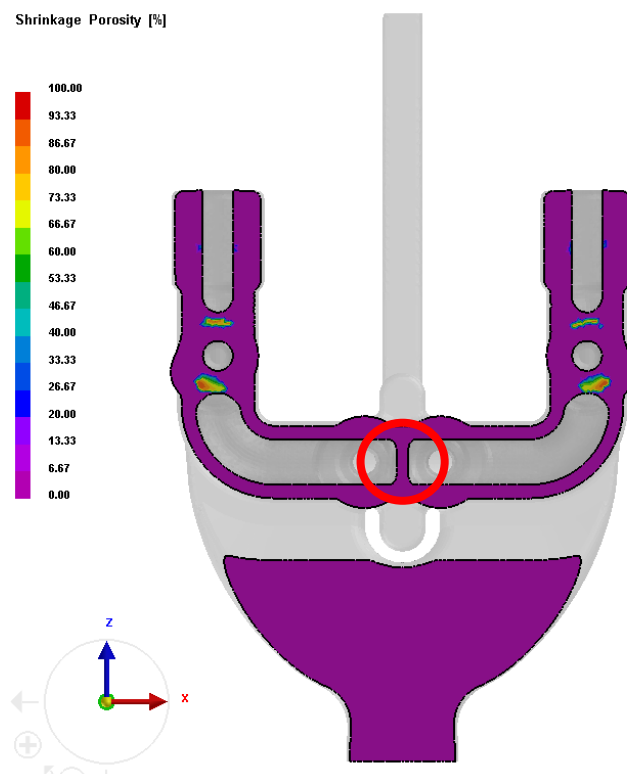
Figura 83 – Esquema da substituição dos machos na peça (Simulação 2)

As condições iniciais e de fronteira usadas nesta simulação estão apresentadas na Tabela 39.

Tabela 39 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 2

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	C45E (Ck45)	170
Macho	Areia de Sílica	120
Manifold-U	CuZnBi	950
<b>Pressão: 0.56 bar</b>		
<b>Arrefecimento a Ar</b>		

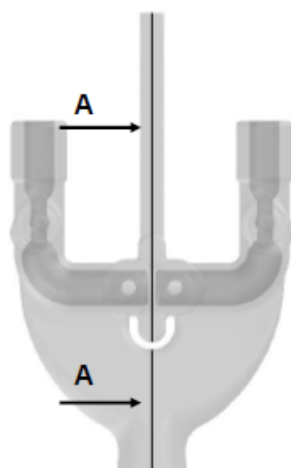
Após a realização da simulação obtiveram-se os resultados. Na Figura 84 estão apresentados os resultados para o aparecimento de rechupes de solidificação obtidos na simulação de solidificação 2, na secção do corte XZ no plano central da peça.



*Figura 84 – Distribuição dos rechupe no corte XZ central (Simulação 2)*

Analisando a Figura 84 pode-se verificar que o rechupe que estava posicionado na posição assinalada deixou de existir. Porém, analisando um outro corte da peça pode-se verificar que o rechupe ainda existe.

Na Figura 85 pode-se ver qual o corte da peça utilizado.



*Figura 85 – Corte A-A*

Os gráficos da distribuição dos rechupes e dos microrechupes na secção A-A da peça são apresentados na Figura 86.

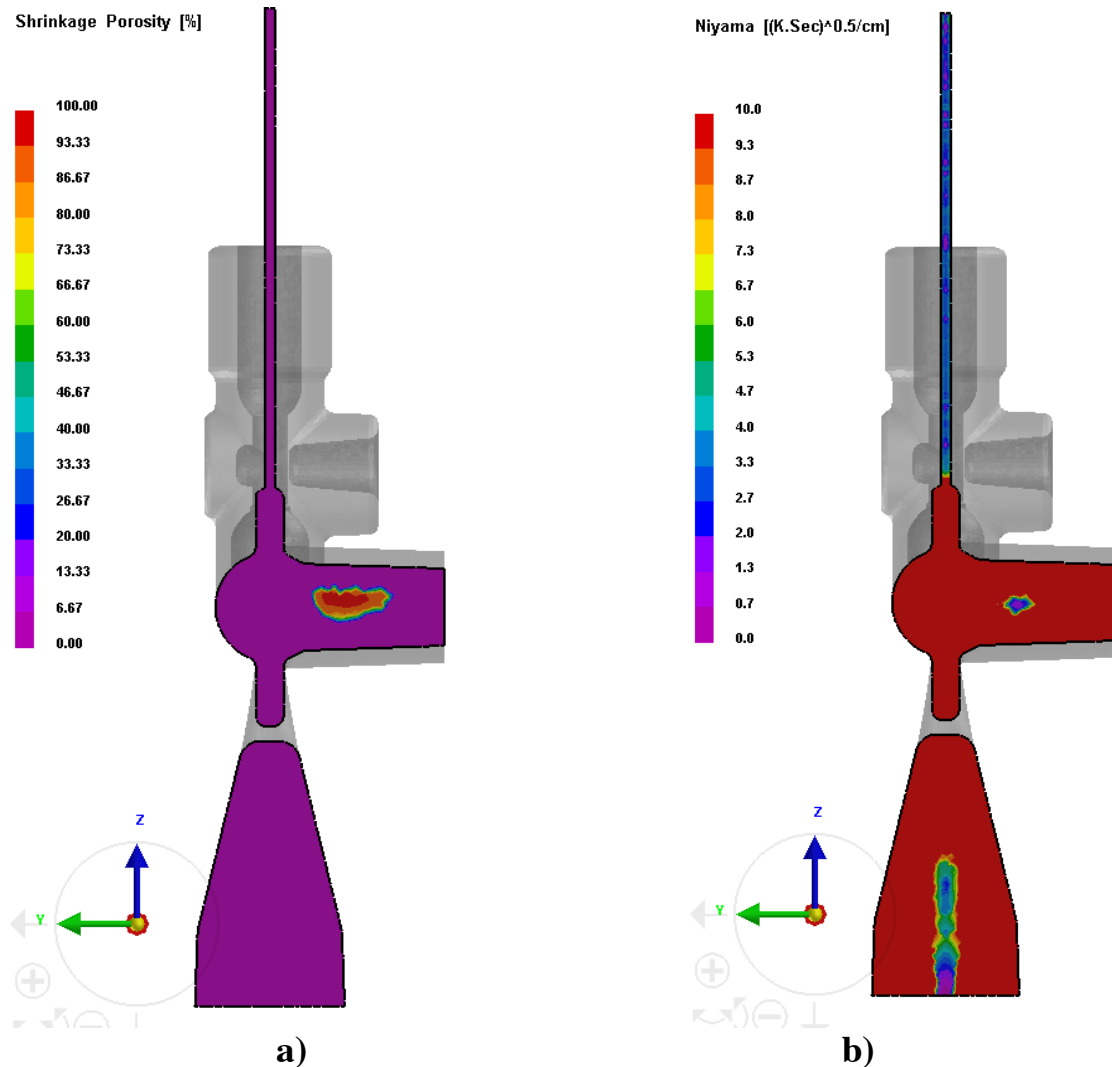


Figura 86 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte A-A; (b)-Distribuição dos microrechupes no corte A-A; (Simulação 2)

Como se pode verificar na Figura 86 a) ainda existe rechupe, porém, devido à alteração do material dos machos utilizados e porque a areia de sílica possui menor condutividade térmica que o aço o rechupe mudou de posição. No entanto, o local para onde o rechupe se deslocou continua a ser problemático pois irá interferir com a posterior maquinagem da peça.

Pode-se então concluir que a alteração dos machos metálicos por machos de areia não resolve o problema de rechupe existente na posição central da peça.

É então necessário pensar numa nova forma de resolver o problema.

### 3.4.3 Simulação de Solidificação 3 (Implementação do Alimentador)

Tendo em conta que na simulação de solidificação 2 a solução adotada não permitiu reduzir nem eliminar os rechupes na zona central da peça foi então necessário pensar numa nova forma de resolver o problema.

Pensou-se então na implementação de um alimentador de topo, de forma cilíndrica, no centro da peça, centrado com a zona da peça afetada.

Em primeiro lugar foi então dimensionado um alimentador.

O dimensionamento deste alimentador mostrou-se um problema de certa dificuldade pois é complicado definir com precisão a área afetada a ser alimentada devido à complexa geometria da peça e pelo facto de os materiais na vizinhança da peça serem diferentes, logo o tempo de solidificação será variável o que torna complicado um dimensionamento exato do alimentador.

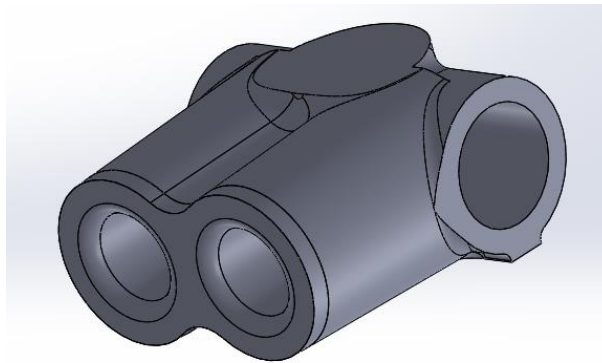
Como referido na secção 2.5.1 o módulo do alimentador calcula-se pela seguinte equação:

$$M_{alimentador} = k \times M_{peça}$$

De acordo com a Tabela 35 considerou-se o coeficiente de segurança  $k = 1.2$ .

Foi necessário seccionar a peça no programa *SolidWorks*, separando-a da porção onde existia o rechupe para calcular o  $M_{peça}$  (módulo da peça), uma vez que o módulo da peça deve ser calculado apenas na zona que se quer alimentar.

A porção usada para calcular o módulo da peça está apresentada na Figura 87.



*Figura 87 – Porção da peça usada no cálculo do alimentador (Simulação 3)*

Foi então necessário determinar o volume da porção da peça e a superfície de arrefecimento. Esses valores foram encontrados através da ferramenta *Evaluate Mass Properties* do *SolidWorks*. Esses valores são apresentados na Figura 88.

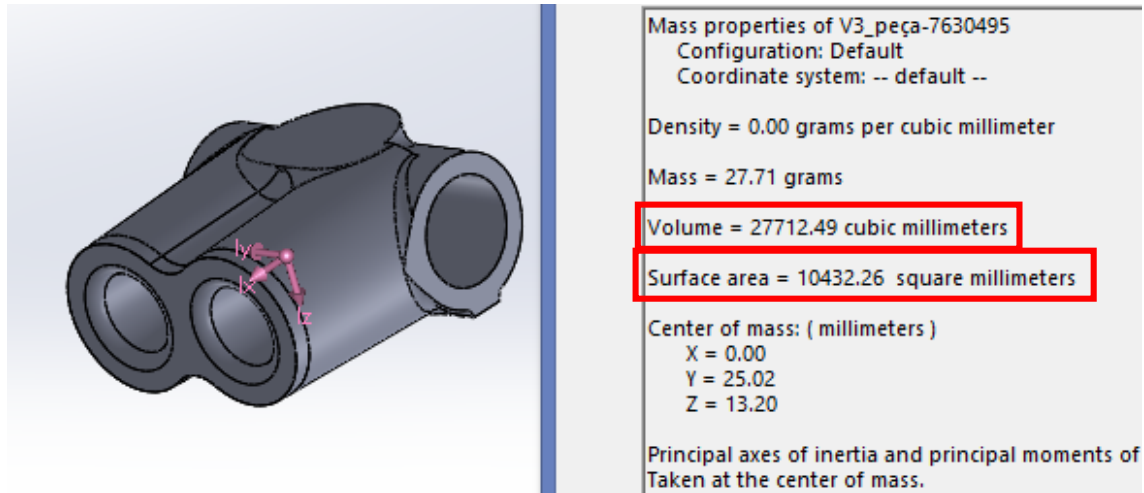


Figura 88 – Valores do volume e da superfície determinadas no SolidWorks (Simulação 3)

Chegou-se então aos valores do volume e da superfície de arrefecimento que estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Valores do volume e da superfície de arrefecimento da porção da peça (Simulação 3)

<b>Volume da Peça</b>	27712.49 mm <sup>3</sup>
<b>Superfície de Arrefecimento da Peça</b>	10432.26 mm <sup>2</sup>

O módulo da peça pode então ser calculado:

$$M_{peça} = \frac{\text{Volume da Peça}}{\text{Superfície de Arrefecimento}} = \frac{27712.49}{10432.26} = 2.6564 \text{ mm}$$

Após calcular o módulo da peça pode-se agora calcular qual o módulo do alimentador.

$$M_{alimentador} = k \times M_{peça} = 1.2 \times 2. = 3.187 \text{ mm}$$

Após determinar o módulo do alimentador pode-se então pensar nas dimensões deste.

Como abordado na 2.5.1 tem que se garantir que:

$$M_{alimentadordimensionado} \geq M_{alimentador}$$

Optou-se por usar um alimentador com as dimensões apresentadas na Tabela 41.

Tabela 41 – Dimensões do alimentador usado (Simulação 3)

<b>Comprimento do Alimentador</b>	45 mm
<b>Diâmetro do Alimentador</b>	20 mm
<b>M<sub>Alimentador</sub></b>	4.09 mm

Como é possível verificar, o módulo do alimentador escolhido é um pouco maior que o necessário mas como durante o dimensionamento do alimentador cometeu-se alguns erros de cálculo dos parâmetros da zona a alimentar devido à dificuldade de calcular esses valores rigorosamente, o uso de um alimentador com um módulo superior faz com que a escolha das dimensões do alimentador fique do lado da segurança.

Na Figura 89 pode-se ver a nova configuração da peça com o alimentador.

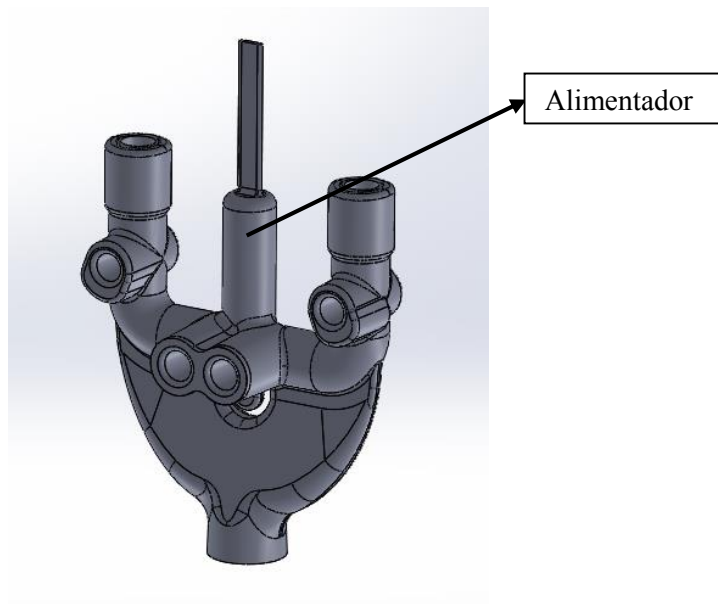


Figura 89 – Configuração dos alimentadores usados na simulação de solidificação 3

Para garantir que o tempo de solidificação do metal no alimentador é superior ao tempo de solidificação do metal na peça optou-se por adicionar um macho de areia em torno do alimentador. A utilização do macho exterior em areia irá fazer com que o arrefecimento do alimentador seja mais lento tornando-o num ponto quente massivo e consequentemente na última zona a solidificar.

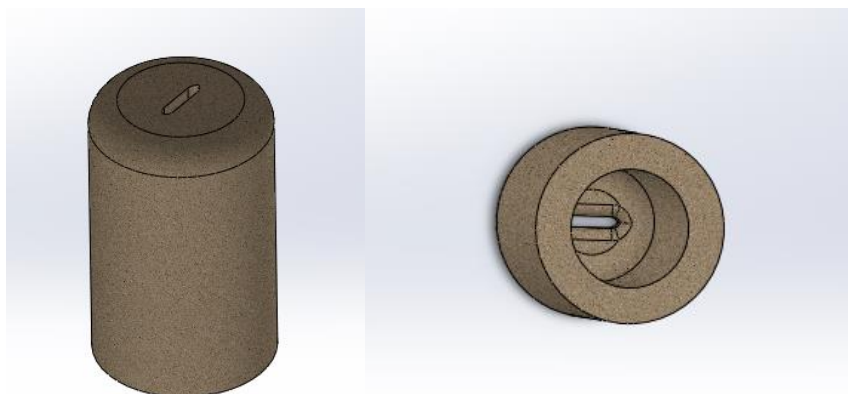
Como é possível verificar no ANEXO B, a gama de valores da condutividade térmica da areia de sílica, entre a temperatura de 0°C e a temperatura de 1000°C, é de 0.60 W/mk a 0.73 W/mk, enquanto que a gama de valores da condutividade térmica do aço C45E (Ck45) entre a temperatura de 0 °C a 1000° C é de 20 W/mk a 30 W/mk. Como a condutividade térmica da areia



de sílica é menor que a do aço, pode-se dizer que o arrefecimento do alimentador será mais lento que o arrefecimento da peça, como pretendido.

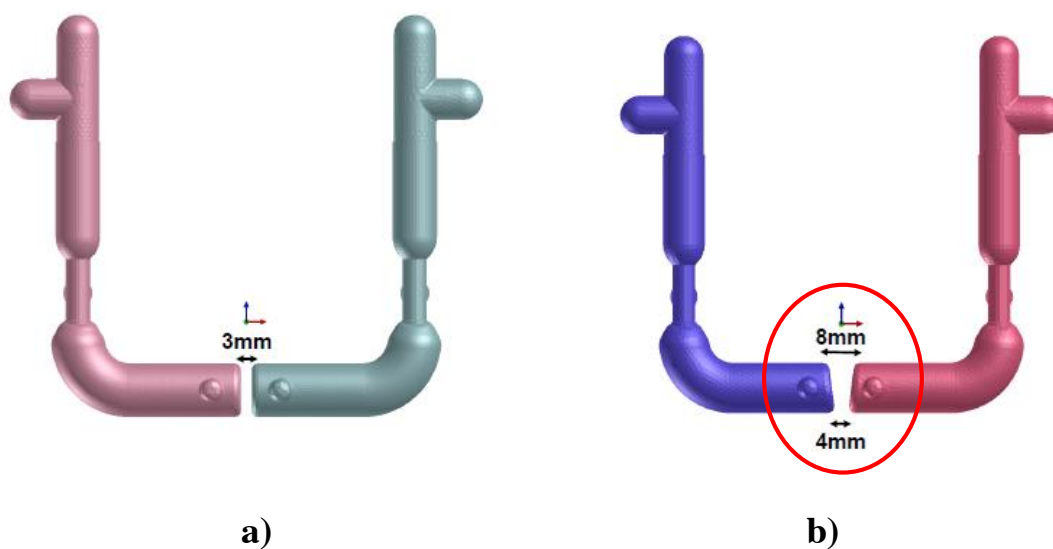
A espessura do macho foi de 6mm, valor usado pela empresa CIFIAL e que foi necessário respeitar.

O macho usado está apresentado na Figura 90.



*Figura 90 – Macho em areia usado na simulação de solidificação 3*

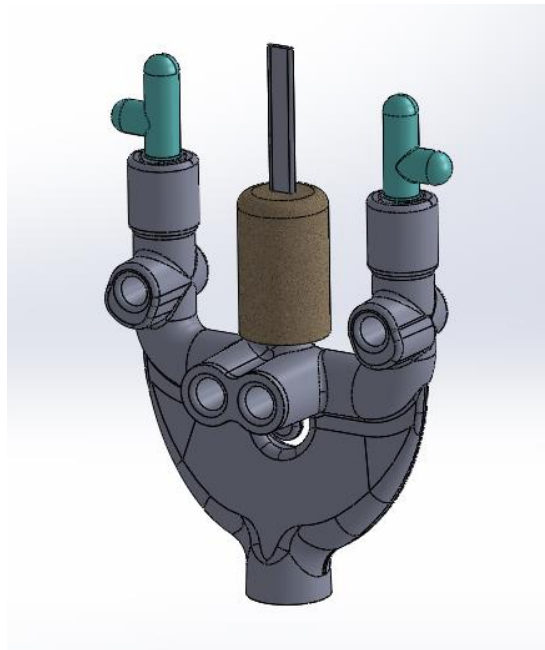
O macho em areia de sílica interior também sofreu alterações. As alterações estão demonstradas na Figura 91.



*Figura 91 – (a)-Macho interior original (Sem alterações); (b)-Macho interior com as alterações efetuadas.*

Esta alteração do macho interior deve-se ao facto de a distância entre as duas partes do macho ser pequena pois pretende-se alimentar essa zona e devido ao espaçamento (3mm) entre as duas partes do macho ser reduzido poderia criar problemas na alimentação e com isso fazer com que a implementação do alimentador não fosse eficaz. Esta alteração em nada afeta o correto funcionamento da peça. Alterou-se então a distância inferior para 4mm e a distância superior para 8mm para melhorar a alimentação.

Na Figura 92 pode-se ver a peça com o alimentador e os machos, configuração essa que será usada na simulação.



*Figura 92 – Peça com alimentadores e machos usados na simulação de solidificação 3*

Após dimensionar o alimentador e alterar o ficheiro CAD da peça em função dessas alterações procedeu-se então à simulação da proposta de solução.

As condições iniciais e de fronteira utilizadas nesta simulação foram as apresentadas na Tabela 42.

Tabela 42 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 3

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	C45E (Ck45)	170
Macho Interior	Areia de Sílica	120
Macho Exterior	Areia de Sílica	120
Manifold-U	CuZnBi	950
<b>Pressão: 0.56 bar</b>		
<b>Arrefecimento a Ar</b>		

Após a simulação obteve-se o modelo de solidificação da peça. Na Figura 93 está apresentado a distribuição da fração sólida da peça na secção do corte XZ no plano central da peça.

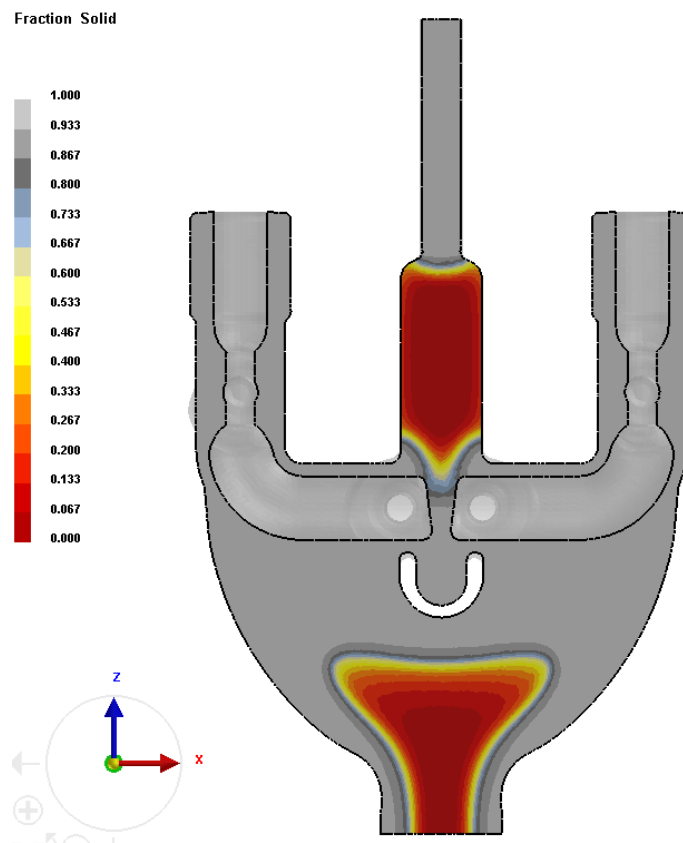
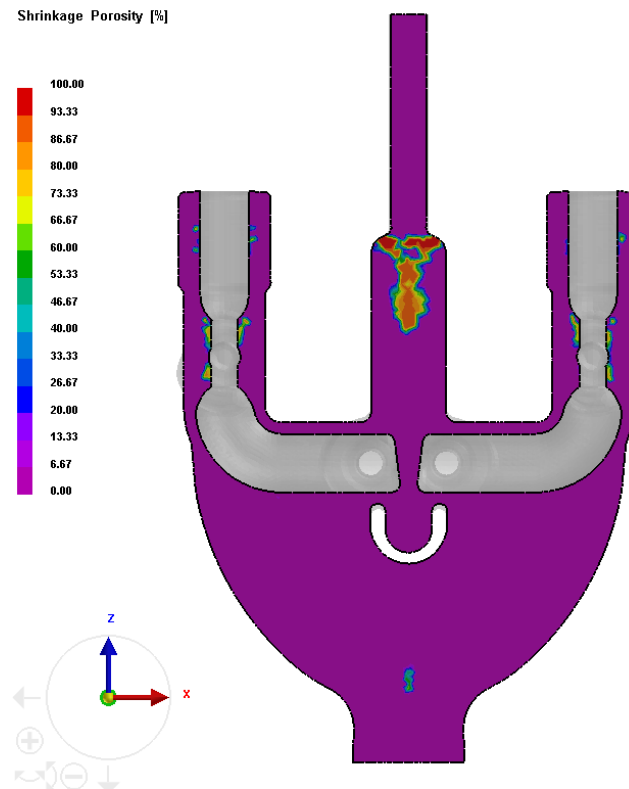


Figura 93 – Distribuição da fração sólida no corte XZ pelo plano central (Simulação 3)

Como é possível concluir da Figura 93, a implementação de um alimentador fez com que as últimas partes da peça a solidificar passem a ser no alimentador. Pode-se ver também que a zona onde apareciam os rechupes ainda é uma zona crítica em termos de fração sólida mas como a

fração sólida da peça no alimentador é muito menor que na zona afetada irá permitir a redução ou mesmo a eliminação do rechupes.

Na Figura 94 pode-se ver a distribuição dos rechupes na secção do corte XZ no plano central da peça.



*Figura 94 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 3)*

Como se pode ver na Figura 94, o problema de rechupes existente desapareceu analisando este plano de corte. Os rechupes, em vez de aparecerem na peça aparecem numa posição mais subida, no alimentador.

Para confirmar se a proposta de solução resolveu o problema analisou-se o corte A-A da peça. A distribuição dos rechupes nesta secção está apresentada na Figura 95.

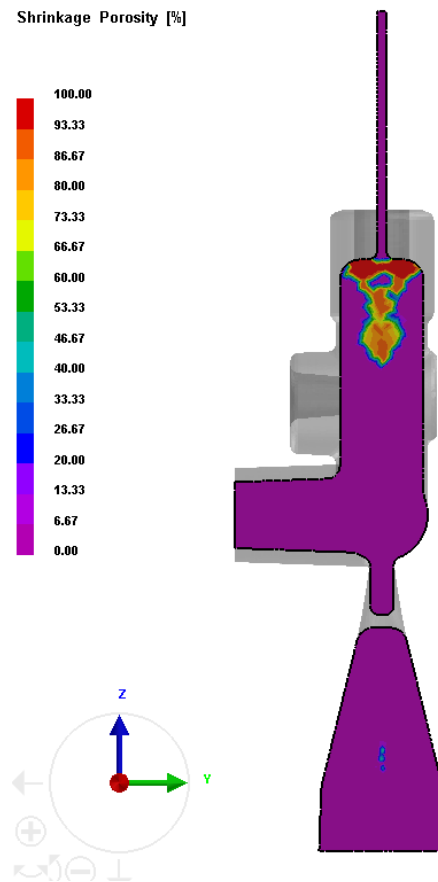


Figura 95 - Distribuição dos rechupes do corte A-A (Simulação 3)

Como se pode verificar na Figura 95 e analisando o corte A-A é possível concluir que o rechupe existente na parte central da peça foi eliminado com sucesso.

#### 3.4.4 Simulação de Solidificação 4 (Comparação entre Temperaturas de Vazamento)

A simulação de solidificação 4 foi realizada devido ao facto de a peça ser vazada na empresa CIFIAL a uma temperatura de 1025°C enquanto nas simulações realizadas anteriormente se ter usado uma temperatura de vazamento de 950°C. No entanto esta diferença de temperatura não irá afetar significativamente a posição dos rechupes, apenas poderá fazer com que sofram alterações de forma. Porém, para confirmar o referido atrás simulou-se o processo de solidificação com uma temperatura de vazamento de 1025°C.

Tendo em conta o explicado acima, as condições iniciais e de fronteira usadas nesta simulação são apresentadas na Tabela 43.

Tabela 43 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 4

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	C45E (Ck45)	170
Macho Interior	Areia de Sílica	120
Macho Exterior	Areia de Sílica	120
Manifold-U	CuZnBi	1025
<b>Pressão: 0.56 bar</b>		
<b>Arrefecimento a Ar</b>		

O sistema de gitagem e alimentação usado nesta simulação foi exatamente o mesmo usado na simulação de solidificação 3. A única diferença entre esta simulação e a simulação de solidificação 3 é a temperatura de vazamento, sendo que nesta foi usada uma temperatura de vazamento de 1025°C.

O sistema de gitagem e alimentação usado está apresentado na Figura 96.

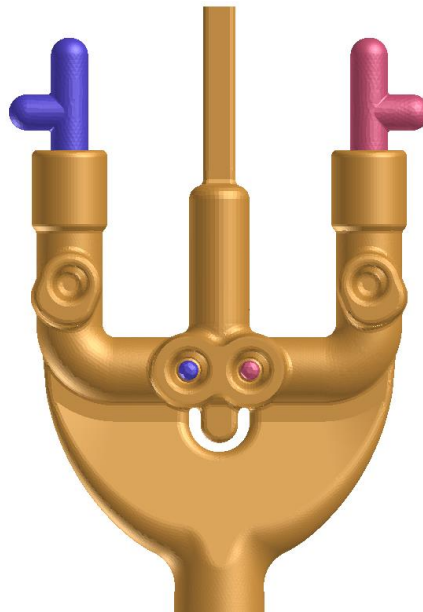


Figura 96 – Sistema de gitagem e alimentação usado na simulação de solidificação 4

Foi usado, tal como na simulação de solidificação 3, um macho em areia sobre o alimentador para aumentar o tempo de solidificação deste e garantir que os rechupes ocorrem no alimentador e não na peça.

O sistema de gitagem e alimentação com o macho está apresentado na Figura 97.

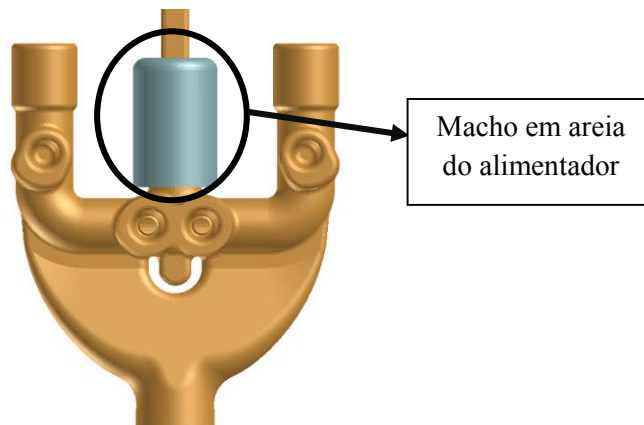


Figura 97 – Sistema de alimentação e gitagem com macho do alimentador usado na simulação 4

Após a realização da simulação obteve-se como resultado a distribuição dos rechupes no plano central XZ apresentados na Figura 98.

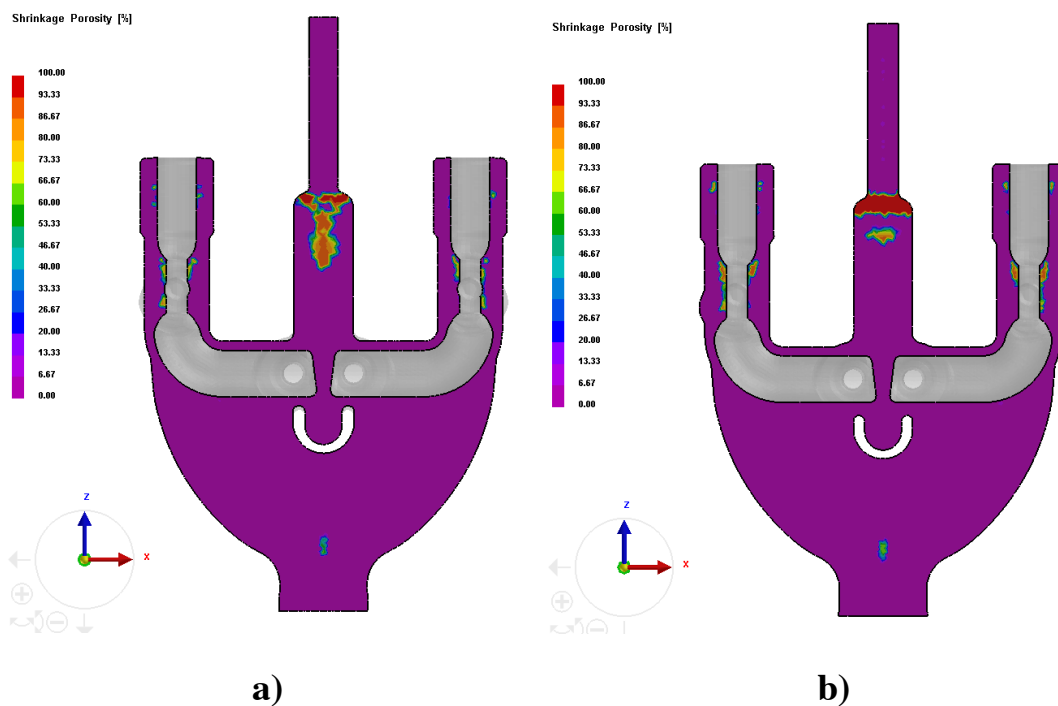


Figura 98 - (a)-Distribuição dos rechupes ( $T_{\text{vazamento}} = 950^{\circ}$  (Simulação3); (b)-Distribuição dos rechupes ( $T_{\text{vazamento}} = 1025^{\circ}$ ) (Simulação 4)

Relativamente ao corte A-A pode-se ver na Figura 99, uma comparação de resultados da simulação de solidificação 3 com a esta simulação, relativamente ao aparecimento de rechupes.

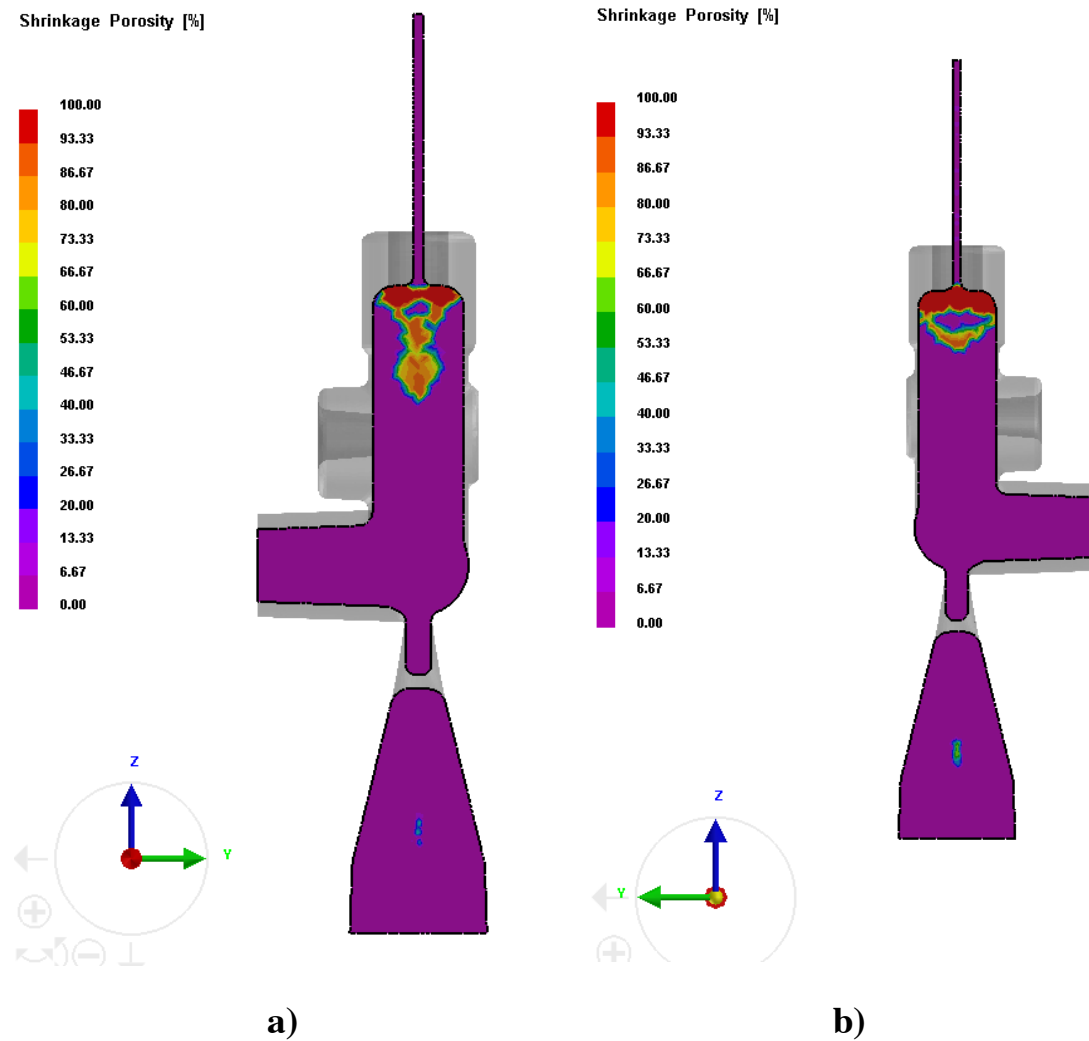


Figura 99 – (a)-Distribuição dos rechupes (Tvazamento - 950°) (Simulação 3); (b)-Distribuição dos rechupes (Tvazamento 1025°) (Simulação 4)

Apesar de o corte A-A nesta simulação estar apresentado numa direção diferente do usado na simulação de solidificação 3, em nada influencia a comparação de resultados pois a secção é exatamente a mesma.

Comparando então a distribuição dos rechupes obtidos na simulação de solidificação 3 (Tvazamento = 950°C) com a distribuição dos rechupes obtidos nesta simulação (Tvazamento = 1025°C) pode-se concluir que apesar de a forma dos rechupes serem um pouco diferentes entre as duas simulações, como se pode verificar na Figura 98 a) e b) e na Figura 99 a) e b), a sua posição é praticamente a mesma e, neste caso, a forma dos rechupes em nada interfere com o funcionamento correto da peça.

Relativamente ao corte B-B, os resultados desta simulação relativamente à distribuição dos rechupes e dos microrechupes estão apresentados na Figura 100.



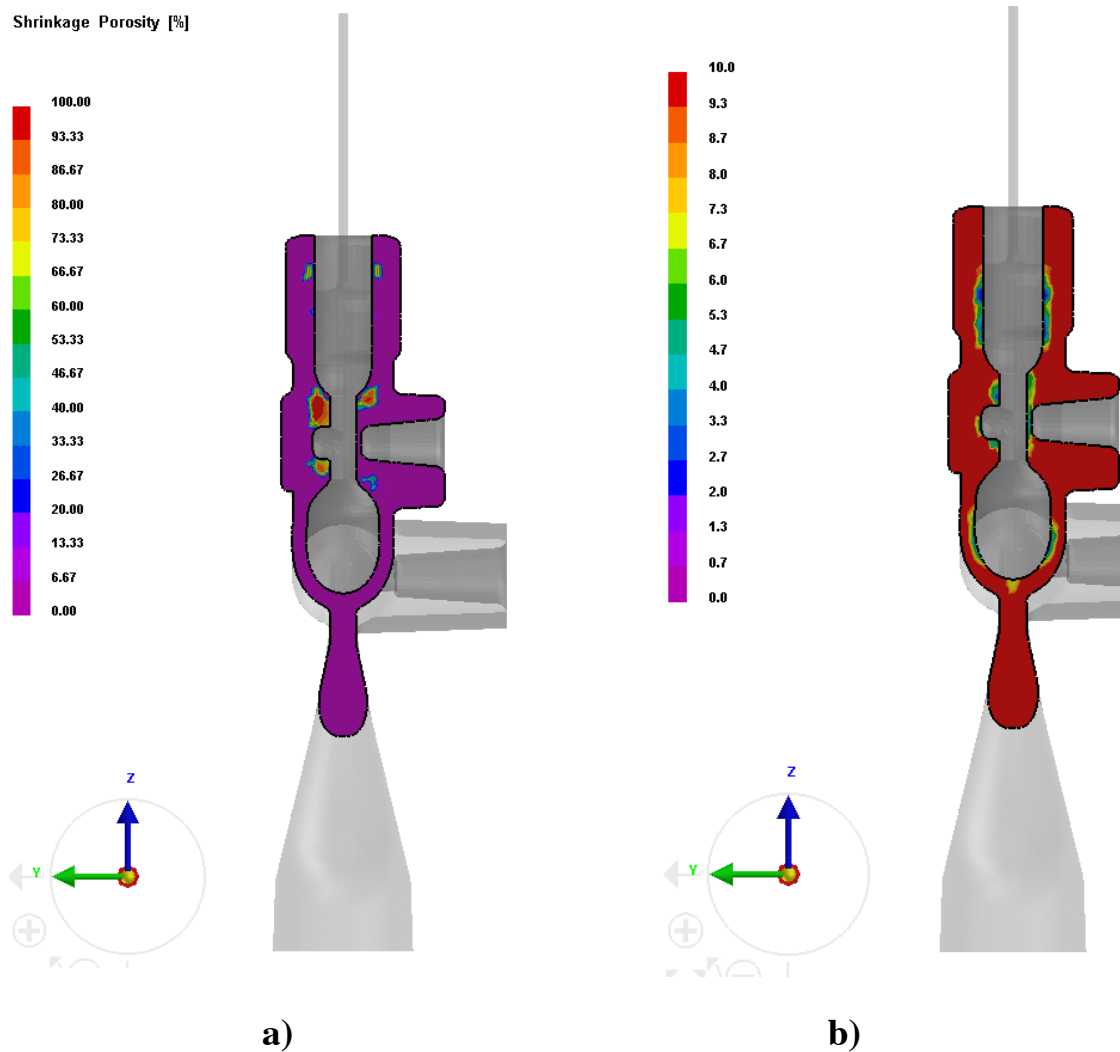


Figura 100 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte B-B;(b)-Distribuição dos microrechupes no corte B-B; (Simulação 4)

### 3.4.5 Simulação de Solidificação 5 (Furos Laterais Tapados)

Como foi possível verificar nas simulações de solidificação 3 e 4, apesar de o rechupe central ter sido eliminado, ainda se podem encontrar rechupes no corte B-B (corte 1 e 2) da peça. Como se verificou na análise da peça, na secção 3.3, os rechupes e os microrechupes encontrados não influenciam o correto funcionamento da peça nem causariam problemas na maquinagem, no entanto, como já referido anteriormente, apenas foi possível analisar uma peça e as conclusões retiradas não são tão rigorosas como se tivessem sido analisadas mais peças. Tendo isto em conta e devido ao facto de a CIFIAL não aceitar realizar as peças com rechupes nestas posições foi necessário eliminar ou diminuir os rechupes existentes.

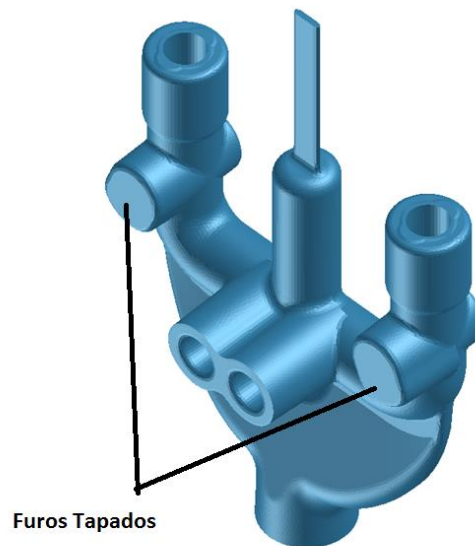
Na tentativa de eliminar esses rechupes, optou-se por tapar os furos, pois estes poderiam ser realizados através de maquinagem. Pensa-se que ao tapar os furos os rechupes existentes nessas zonas possam desaparecer ou mudar para uma posição que não influenciem o correto funcionamento da peça nem gere problemas durante a maquinagem.

Por isso, foi realizada uma simulação para prever o que aconteceria se esses furos fossem tapados. As condições iniciais e de fronteira utilizadas nesta simulação são apresentadas na Tabela 44.

*Tabela 44 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 5*

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	C45E (Ck45)	170
Macho Interior	Areia de Sílica	120
Macho Exterior	Areia de Sílica	120
Manifold-U	CuZnBi	1025
Pressão: 0.56 bar		
Arrefecimento a Ar		

Nesta simulação foi usado o sistema de gitagem e alimentação apresentado na Figura 101. É possível verificar que os furos se encontram tapados.



*Figura 101 – Sistema de gitagem e alimentação usada na simulação de solidificação 5*

Após a simulação obteve-se o modelo de solidificação da peça. Através do corte pelo plano XZ central da peça é possível analisar os locais mais propícios ao aparecimento de rechupes através da fração sólida de peça. Na Figura 102 está apresentada a fração sólida da peça nesta simulação.

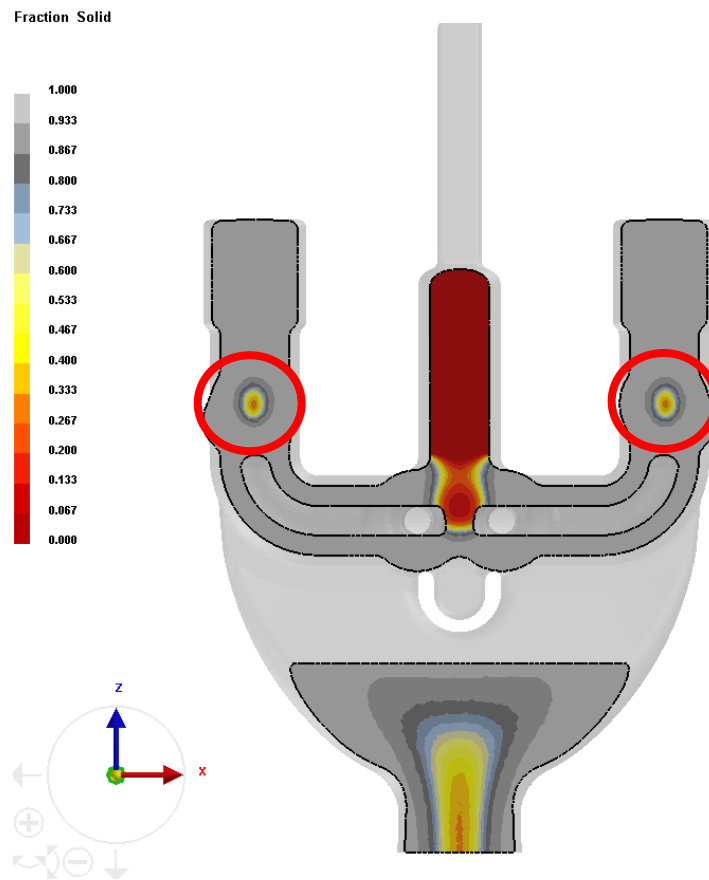
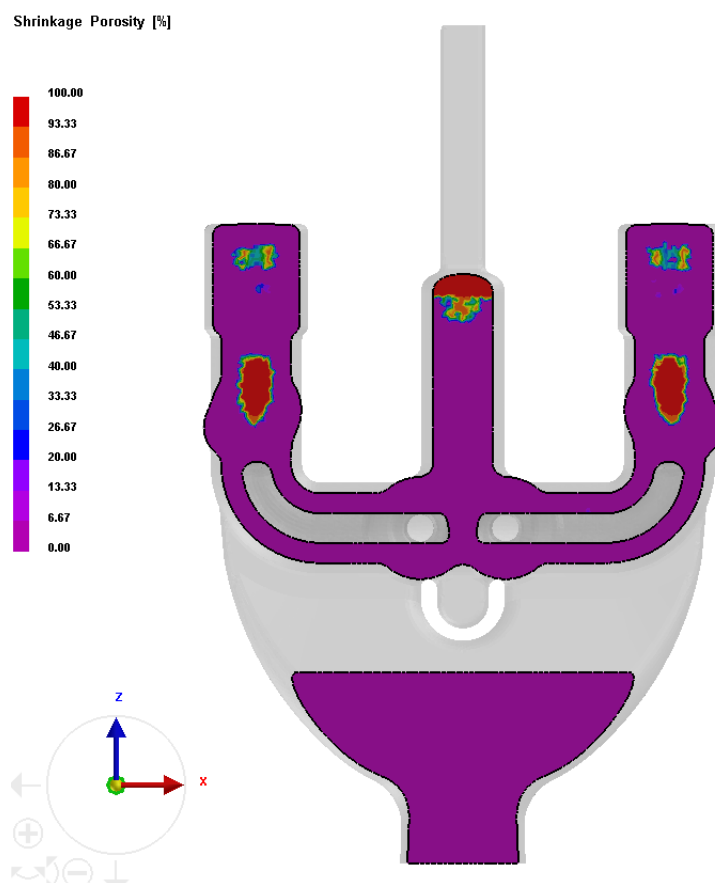


Figura 102 – Distribuição da fração sólida no plano XZ central.(Simulação 5)

Da Figura 102 pode-se concluir que os pontos mais propícios ao aparecimento de rechupes são os pontos assinalados pois são os últimos pontos a solidificar na sua vizinhança.

O ponto central onde existia rechupe, como se pode ver na Figura 102, é também dos pontos da peça onde a fração sólida é menor, no entanto, como contém um alimentador colocado nessa zona, e sendo que este, como já visto na simulação 3, solidifica mais lentamente, faz com que não ocorra rechupe nesse ponto.

Na Figura 103 é possível ver os resultados da simulação de solidificação para a ocorrência de rechupes.



*Figura 103 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 5)*

Da Figura 103 é possível concluir que os rechupes continuam a ocorrer na mesma zona. No entanto, estes rechupes são maiores pois o facto de se tapar os furos faz com que o volume da zona aumente e a superfície de arrefecimento diminua fazendo com que a probabilidade de aparecer rechupes seja maior pois o tempo de solidificação aumenta.

Na Figura 104 é possível ver a distribuição dos rechupes e dos microrechupes no corte B-B da peça.

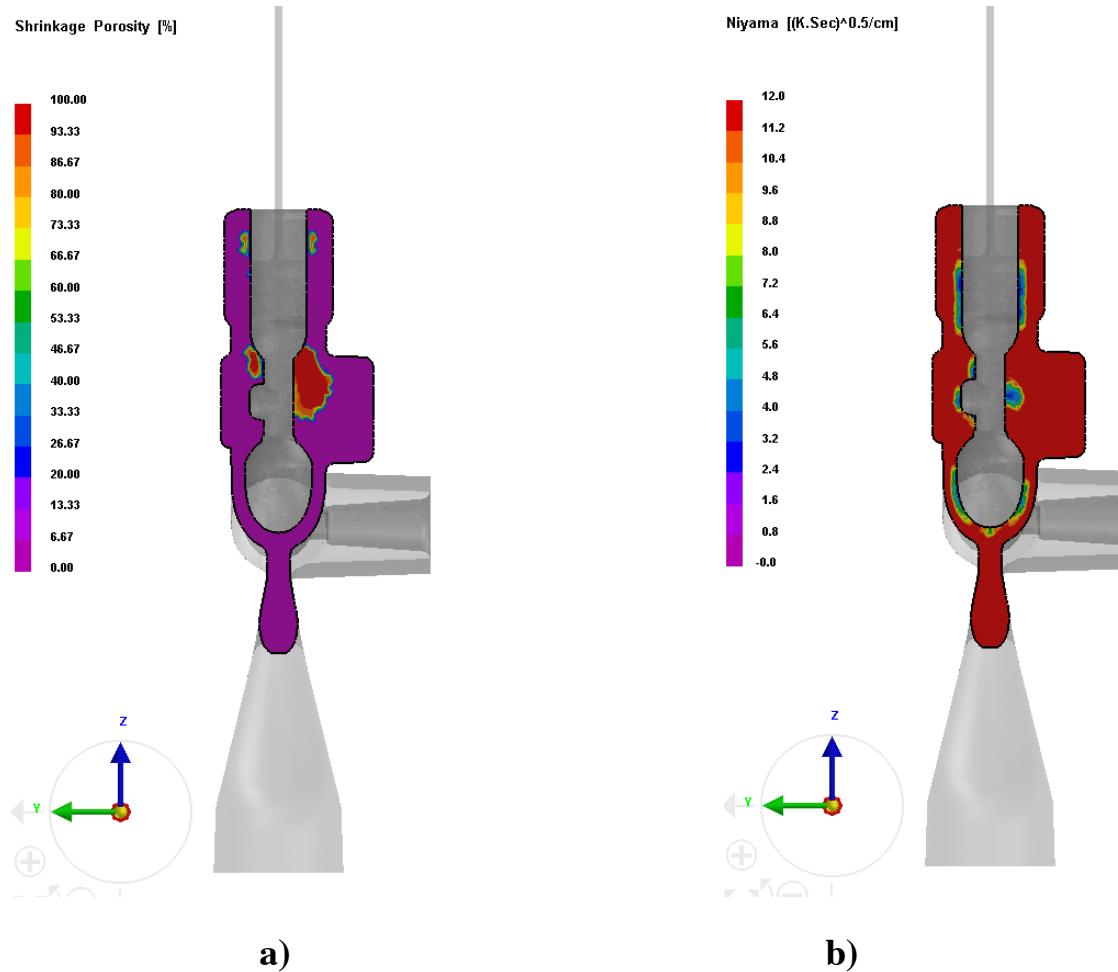


Figura 104 – (a)-Distribuição dos rechupes do corte B-B; (b) -Distribuição dos microrechupes no corte B-B; (Simulação 5)

Como é possível concluir da Figura 104, a opção tomada de tapar os furos não só não resolveu o problema como aumentou o rechupe. É então necessário pensar estudar uma nova solução para o problema.

### 3.4.6 Simulação de Solidificação 6 (Implementação do Segundo Alimentador)

Como foi possível concluir da análise dos resultados da simulação de solidificação 5, a solução adotada não foi capaz de reduzir ou mesmo eliminar os rechupes existentes.

Foi necessário então pensar numa nova solução para o problema.

A proposta de solução para eliminar estes rechupes passou pela implementação de alimentadores nas zonas afetadas, tal como se procedeu para eliminar o rechupe central da peça.

O posicionamento dos alimentadores teve em consideração a já existência do alimentador calculado para a simulação de solidificação 3. Um outro aspeto importante relativamente ao seu posicionamento foi tentar que o alimentador fique o mais centrado possível com a zona defeituosa.

Em primeiro lugar, tal como na simulação de solidificação 3 foi necessário calcular o módulo do alimentador.

Irá ser calculado o alimentador apenas para um dos lados da peça, sendo que para o outro lado o alimentador será igual pois a peça é simétrica.

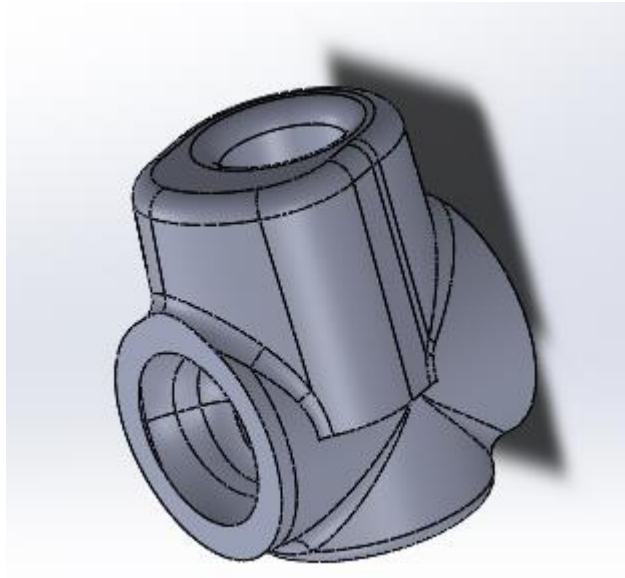
Como referido na secção 2.5.1 o módulo do alimentador calcula-se pela seguinte equação:

$$M_{alimentador} = k \times M_{peça}$$

De acordo com a Tabela 35 considerou-se o coeficiente de segurança  $k = 1.2$

Para calcular o  $M_{peça}$  (módulo da peça) foi necessário seccionar a peça no programa *SolidWorks* separando-a da porção onde existia o rechupe, uma vez que o módulo da peça deve ser calculado apenas do local que se quer alimentar.

A porção usada para calcular o módulo da peça está apresentada na Figura 105.



*Figura 105 – Porção da peça usada no cálculo do alimentador (Simulação 6)*

Através da ferramenta *Evaluate Mass Properties* do *SolidWorks* obteve-se o volume e a área de superfície da peça. Esses valores são apresentados na Figura 106.

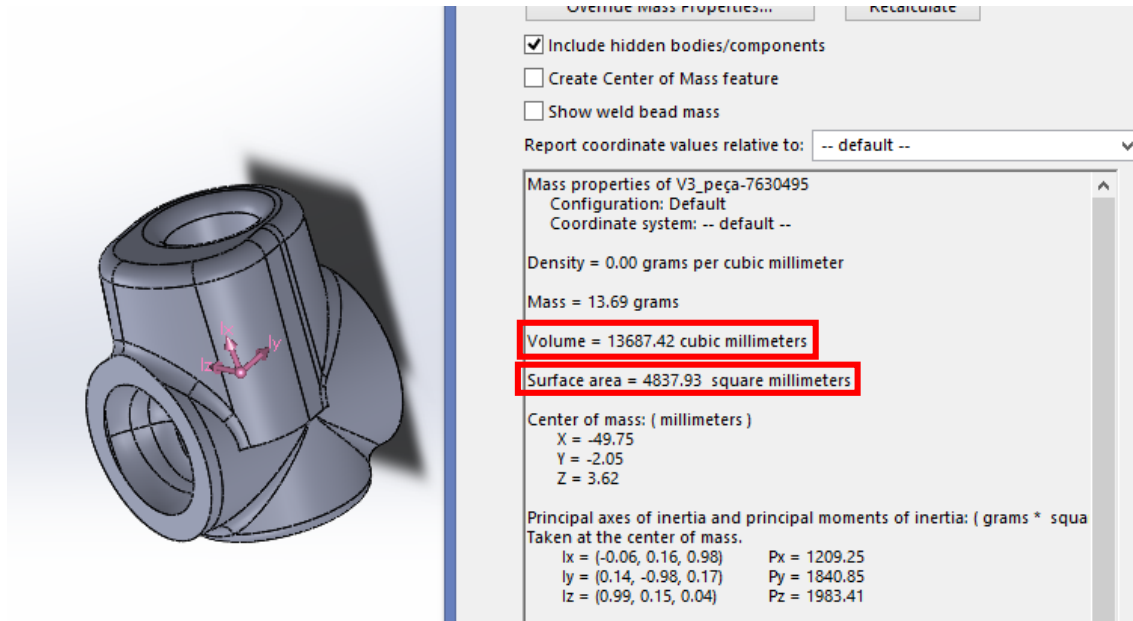


Figura 106 – Valores do volume e da superfície determinado no SolidWorks (Simulação 6)

Então, após a análise dos valores, os valores do volume e da superfície de arrefecimento são os apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 – Valores de volume e da superfície de arrefecimento da porção da peça (Simulação 6).

<b>Volume da Peça</b>	13687.42 mm <sup>3</sup>
<b>Superfície de Arrefecimento da Peça</b>	4837.73 mm <sup>2</sup>

O módulo da peça pode então ser calculado:

$$M_{peça} = \frac{\text{Volume da Peça}}{\text{Superfície de Arrefecimento}} = \frac{13687.42}{4837.73} = 2.829 \text{ mm}$$

Após calcular o módulo da peça pode-se agora calcular qual o módulo do alimentador.

$$M_{alimentador} = k \times M_{peça} = 1.2 \times 2.829 = 3.395 \text{ mm}$$

Após determinar qual o módulo do alimentador pode-se então determinar quais as dimensões deste.

O dimensionamento do alimentador está limitado em termos de comprimento pois este depende da distância entre alimentador já dimensionado na simulação de solidificação 3 e a peça. Esse comprimento pode ser visto na Figura 107.

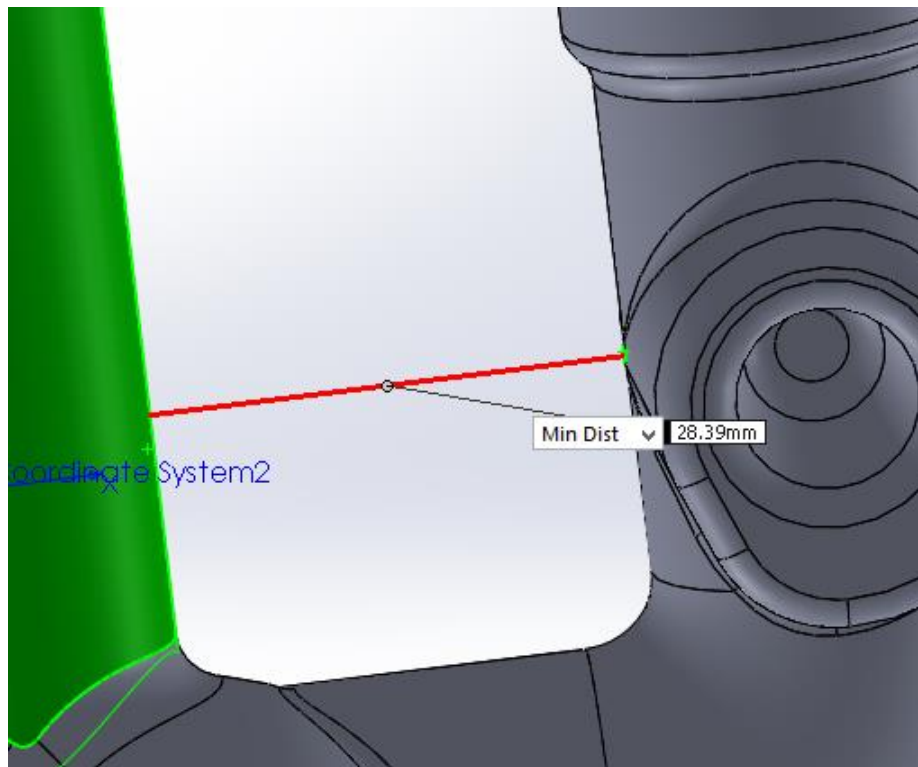


Figura 107 – Comprimento máximo do alimentador (Simulação 6)

Como o comprimento do alimentador tem de ser necessariamente 28.39 mm, é necessário determinar um valor para o diâmetro para o que:

$$M_{\text{alimentador dimensionado}} \geq M_{\text{alimentador}}$$

Após várias iterações concluiu-se que as dimensões necessárias do alimentador seriam as apresentadas na Tabela 46.

Tabela 46 – Dimensões teóricas do alimentador (Simulação 6)

<b>Comprimento do Alimentador</b>	28.39 mm
<b>Diâmetro do Alimentador</b>	18 mm
<b><math>M_{\text{Alimentador}}</math></b>	3.416 mm

No entanto, tendo em conta que irá ser montado um macho em areia em torno do alimentador, e sabendo que esse macho deverá ter 6 mm de espessura, de acordo com o utilizado na empresa CIFIAL, foi detetado um problema de atravancamento ao usar um alimentador de 18 mm de diâmetro.



Foi necessário então reduzir o diâmetro do alimentador para 16 mm. Esta alteração, apesar de alterar o módulo do alimentador para um valor inferior ao necessário não deverá trazer grandes problemas ao correto funcionamento do mesmo pois este está inserido num macho em areia.

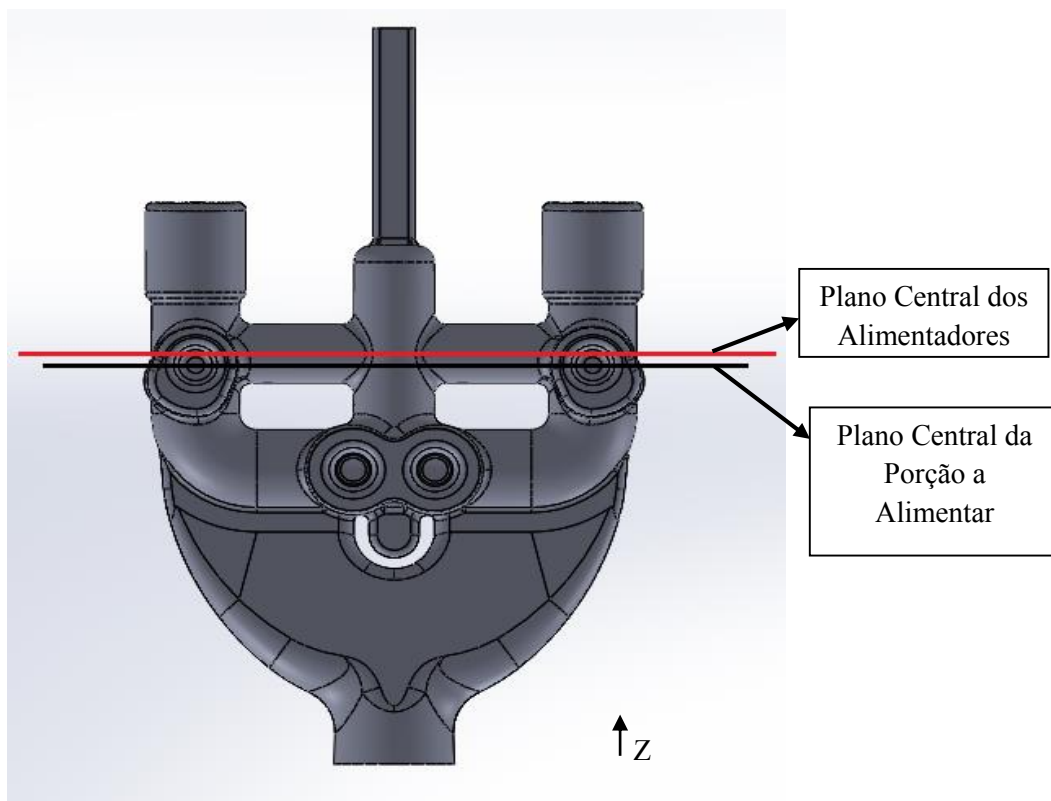
O método usado no cálculo dos alimentadores tem em conta que os meios de arrefecimento são iguais para a peça e para o alimentador, o que não acontece neste caso.

Então as dimensões do alimentador usado são as apresentadas na Tabela 47.

*Tabela 47 – Dimensões do alimentador usado (Simulação 6)*

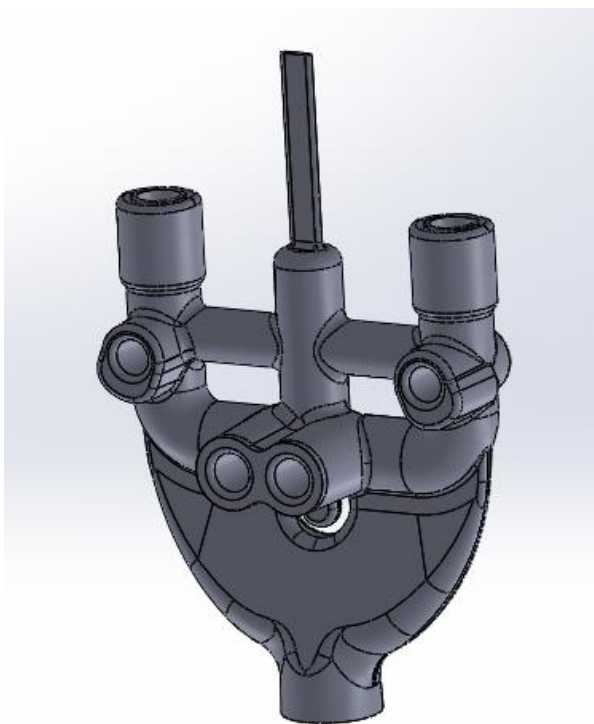
<b>Comprimento do Alimentador</b>	28.39 mm
<b>Diâmetro do Alimentador</b>	16 mm
<b><math>M_{\text{Alimentador}}</math></b>	3.121 mm

Mesmo assim, após a redução do diâmetro do alimentador, ainda persistiam os problemas de atravancamento e foi necessário mover o alimentador na direção Z, como se pode ver na Figura 108.



*Figura 108 – Posição dos alimentadores na peça (Simulação 6)*

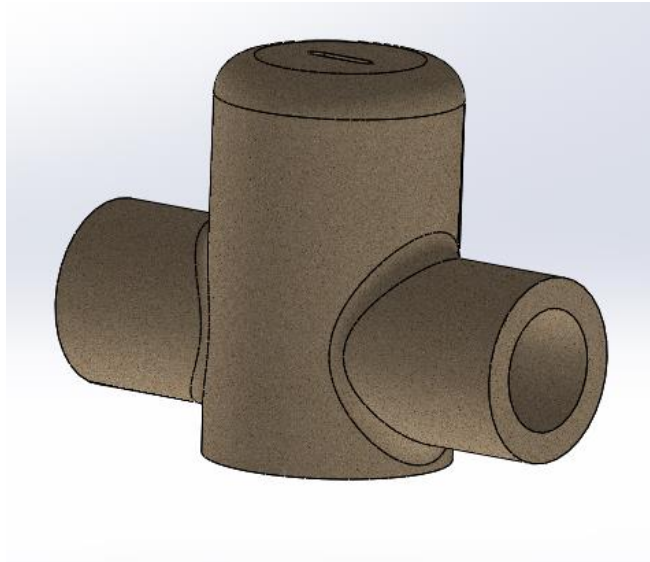
Como os alimentadores agora dimensionados serão ligados ao alimentador central, na Figura 109 pode-se ver a nova configuração dos alimentadores na peça.



*Figura 109 – Configuração dos alimentadores usados na simulação de solidificação 6*

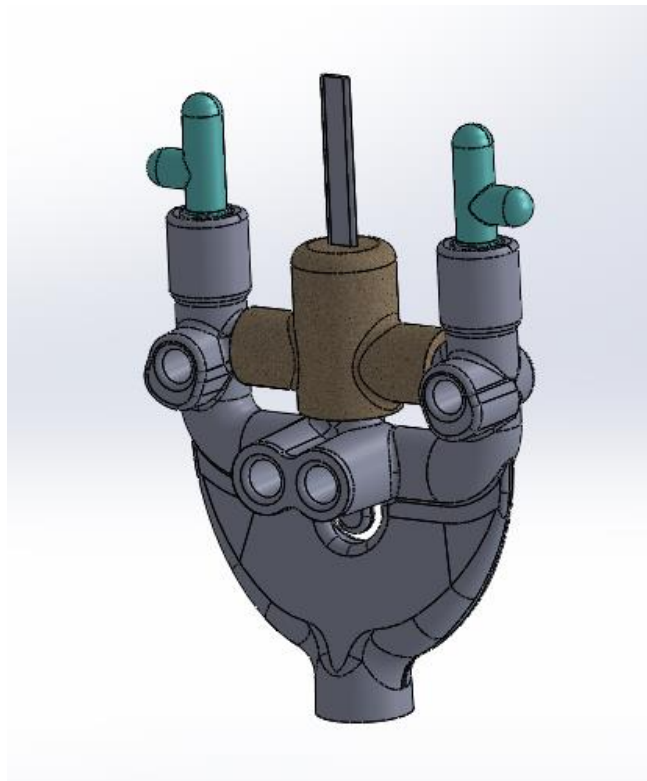
Foi também necessário alterar o macho em areia. Alterou-se então o macho que era usado no alimentador dimensionado na simulação de solidificação 3 para que este seja um macho único que envolve os três alimentadores.

O macho, já após as alterações está apresentado na Figura 110.



*Figura 110 – Macho em areia usado na simulação de solidificação 6*

Na Figura 111 pode-se ver a peça com os novos alimentadores e machos, configuração essa que será usada na simulação.



*Figura 111 – Peça com alimentadores e machos usados na simulação de solidificação 6*

As condições iniciais e de fronteira usadas nesta simulação estão apresentadas na Tabela 48.

Tabela 48 – Condições iniciais e de fronteira usadas na simulação de solidificação 6

Peça	Material	Temperatura Inicial (°C)
Coquilha	C45E (Ck45)	170
Macho Interior	Areia de Sílica	120
Macho Exterior	Areia de Sílica	120
Manifold-U	CuZnBi	1025
<b>Pressão: 0.56 bar</b>		
<b>Arrefecimento a Ar</b>		

Depois de realizada a simulação obteve-se o modelo de solidificação da peça. Na Figura 112 é possível ver a distribuição da fração sólida da peça na secção do corte XZ no plano central da peça em dois instantes diferentes na solidificação do metal vazado.

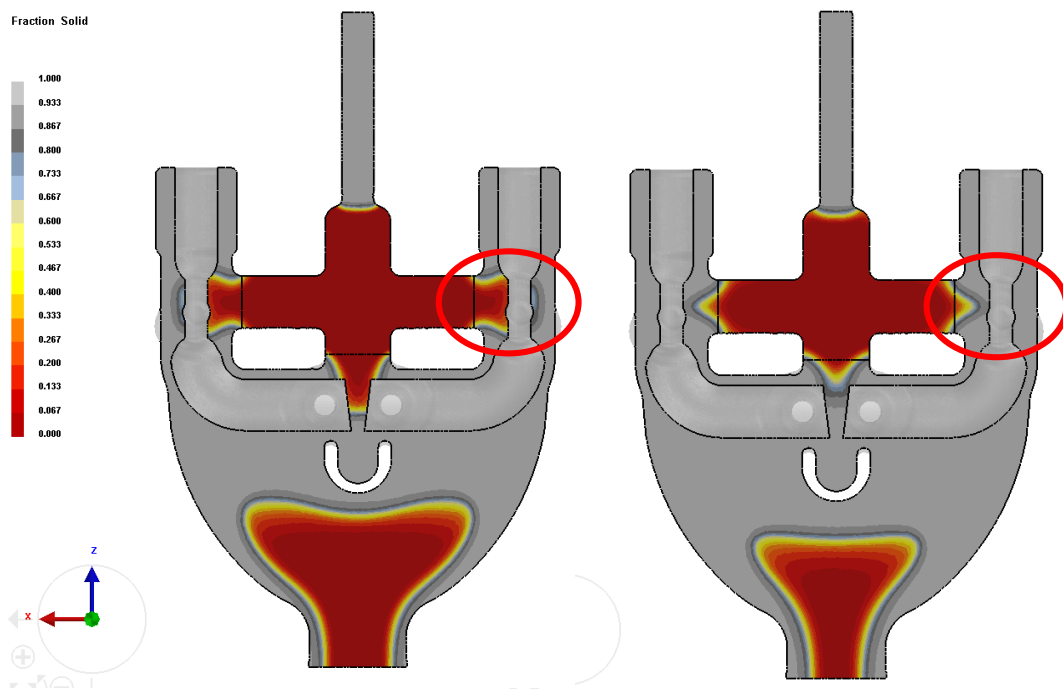
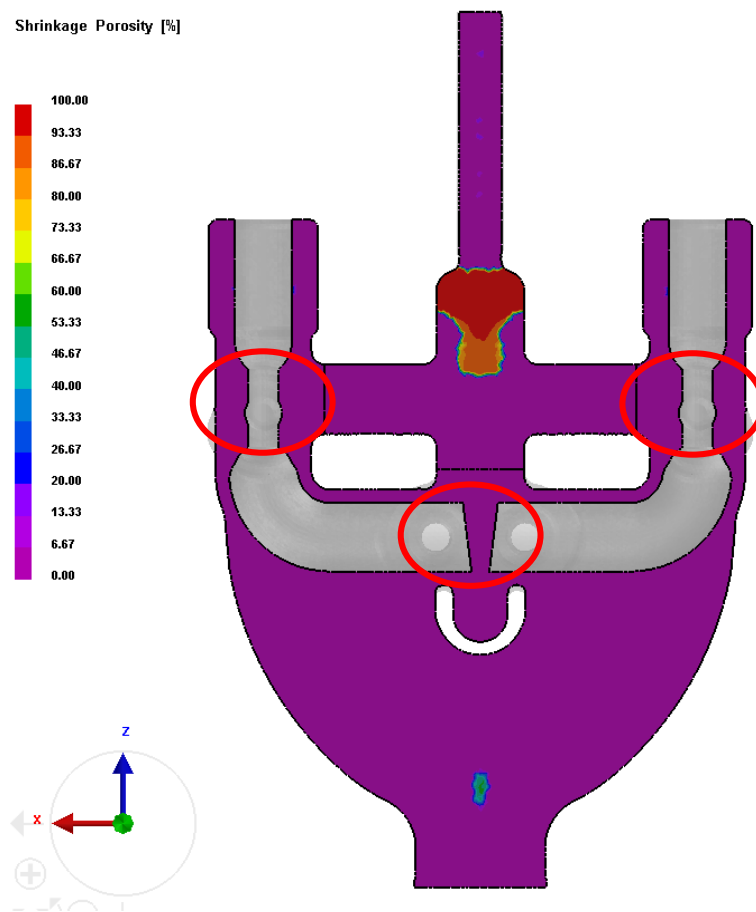


Figura 112 – Distribuição da fração sólida em dois momentos diferentes na solidificação (Simulação 6)

É então possível verificar que o novo *design* do alimentador funciona bem na compensação da contração que origina o rechupe. Pode-se concluir da Figura 112 que o alimentador é a última parte da peça a solidificar, como é desejável.

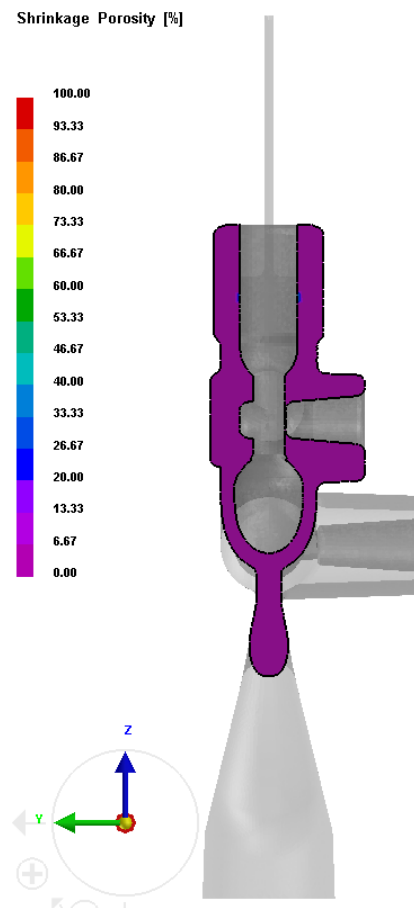
Na Figura 113 está apresentada a distribuição dos rechupes na secção do corte XZ no plano central da peça.



*Figura 113 – Distribuição dos rechupes no corte XZ central (Simulação 6)*

Analisando a distribuição dos rechupes apresentada na Figura 113 pode-se concluir que os rechupes que existiam nas posições assinaladas desapareceram devido à implementação do novo design do alimentador.

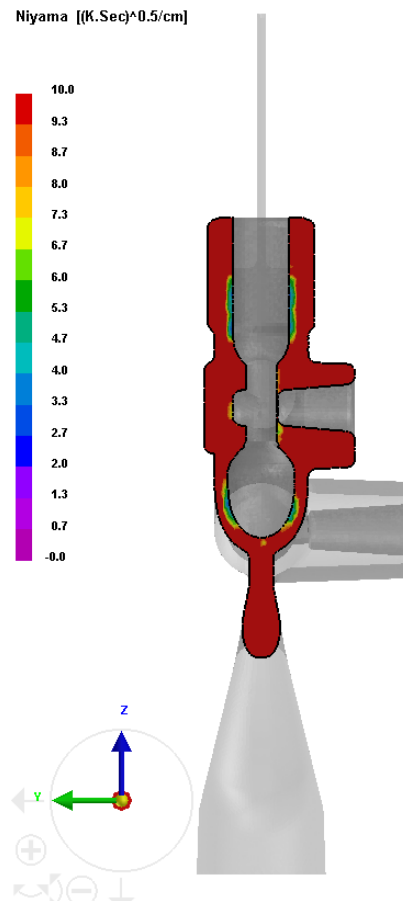
Para confirmar que a peça já não apresenta rechupes está apresentada na Figura 114 a distribuição dos rechupes na secção do corte B-B.



*Figura 114 – Distribuição dos rechupes do corte B-B (Simulação 6)*

Como é possível verificar na Figura 114, também no corte B-B a peça está isenta de rechupes permitindo assim reforçar a conclusão a que se chegou anteriormente.

Na Figura 115 está apresentada a distribuição dos microrrechupes na secção do corte B-B.



*Figura 115 – Distribuição dos microrechupes do corte B-B (Simulação 6)*

Pode-se concluir da Figura 115 que existem ainda alguns microrechupes presentes na secção do corte A-A. No entanto a sua presença não irá provocar o mau funcionamento da peça.

Após a realização da simulação de solidificação 6 pode-se afirmar que a implementação de alimentadores constituídos por um macho em areia de sílica eliminou os rechupes existentes na peça. O sistema de gitagem e alimentação usado nesta simulação de solidificação será o sistema que permitirá eliminar os rechupes na peça. Porém, será necessário validar esta solução através da análise de peças produzidas através do sistema de gitagem e alimentação proposto.





## 4 CONCLUSÕES

---

Os objetivos propostos para esta dissertação foram a análise de defeitos numa peça produzida pela CIFIAL através do processo de fundição por baixa pressão e projeto de um sistema de gitagem e alimentação com o intuito de resolver os problemas existentes. Foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos temas abordados no trabalho experimental de forma a suportar as escolhas e os resultados obtidos. Todo o trabalho realizado no decorrer desta dissertação foi muito importante no ponto de vista da aquisição de conhecimentos permitindo compreender melhor os problemas do dia-a-dia de um engenheiro, a forma de lidar com esses problemas, o método de trabalho das empresas e o processo de busca de soluções na resolução de problemas. De salientar a visita à empresa CIFIAL com o objetivo de fotografar os defeitos comuns nas peças que permitiu perceber melhor qual a forma e o aspeto dos defeitos.

Após a realização desta dissertação é possível apresentar as seguintes conclusões:

- A legislação que limita o uso de chumbo em canalizações trouxe problemas à indústria de fundição de torneiras e derivados pois a alteração fez com que peças vazadas que não continham defeitos passassem a apresentar defeitos e tornou mais complicada a posterior maquinagem das peças em latão devido ao facto de as ligas de cobre sem chumbo levarem a um maior desgaste das ferramentas.
- A simulação numérica apresenta resultados próximos aos que se verificam na realidade como foi possível verificar na simulação de solidificação 1 onde os locais que possuíam rechupes na peça simulada coincidem com os locais onde a peça real tem rechupes. Pode-se concluir que a simulação numérica é uma excelente ferramenta a ser usada na fase de projeto de uma coquilha pois consegue prever com um grau de confiança elevado quais os problemas que poderão surgir ao usar determinado sistema de gitagem e alimentação. No entanto, a posição exata dos defeitos ( $\pm 1\text{mm}$ ) pode não ser possível de prever. Poderão também haver discrepâncias relativamente à forma e às dimensões dos defeitos quando comparados com a peça real.
- A introdução de alimentadores constituídos por um macho em areia na área afetada por rechupes é uma abordagem de onde advém bons resultados, eliminando completamente os rechupes na peça em estudo.
- A solução adotada na simulação de solidificação 6 é a solução que apresenta melhores resultados sendo essa a solução que deverá ser testada na prática.

Pode-se então concluir que a implementação do sistema de gitagem e alimentação definido irá, na prática, trazer muitas melhorias ou mesmo resolver o problema existente pois, como já foi referido, a simulação numérica de solidificação apresenta resultados próximos da realidade. No entanto, esta solução carece de uma validação, sendo que esta apenas é possível através da análise de peças produzidas utilizando o sistema de gitagem e alimentação definido.



## 5 TRABALHOS FUTUROS

---

Poderão e deverão ser realizados diversos trabalhos futuros no contexto desta dissertação, sendo propostos os seguintes:

- Implementar as soluções propostas e simuladas na empresa, no entanto este trabalho não depende do INEGI, mas sim da empresa CIFIAL.
- Validar as soluções propostas através da análise de peças vazadas comparando-as com os resultados obtidos na simulação numérica através do programa ProCAST.
- No caso de as soluções propostas serem eficazes na realidade, e visto que na fase de teste a coquilha é construída em aço C45E (Ck45), seria necessário elaborar a coquilha final em cobre-berílio, sendo que esta tarefa apenas depende da empresa CIFIAL.
- Na possibilidade da empresa adotar as soluções propostas, comparar as peças obtidas antes das modificações com as peças obtidas após a implementação do novo sistema de gitagem e alimentação.
- Analisar os custos inerentes da implementação de um programa de simulação na empresa tentando perceber se esta implementação seria benéfica para os interesses da CIFIAL ou se seria mais vantajoso continuar a subcontratar a realização de trabalhos de simulação.



## 6 REFERÊNCIAS

---

- AFIR, Universal. 2014. Catálogo Ligas Não Ferrosas Universal.
- AFS. 2014. "Lead-Free Copper-Base Alloys". Acedido a 12/03/2015. <http://www.afsinc.org/content.cfm?ItemNumber=6917>.
- American Foundrymen's, Society. 1993. *Aluminum casting technology*. Vol. 2nd ed. Des Plaines, IL: American Foundrymen's Society.
- American Society, for Metals. 1961. *Metals Handbook*. Vol. 8th ed. Ohio: ASM.
- B. Bonatto, M. Botter, F. Bonollo e J. Urban. 2005. "Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark.". *La Metallurgia Italiana*.
- Beckermann, Kent Clarkson and Christoph. 2009. *Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion*. Vol. 40: Metallurgical and Materials Transactions A.
- Beeley, Peter. 2001. *Foundry technology*. Butterworth-Heinemann.
- Bibby, J. Beddoes and M. J. 1999. *Principles of Metal Manufacturing Processes*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Brown, John R. 1999. "Chapter 10 - Low pressure and gravity diecasting". Em *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, editado por John R. Brown, 118-134. Oxford: Butterworth-Heinemann. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750642866500115>.
- Campbell, John. 2011. "Chapter 16 - Casting". Em *Complete Casting Handbook*, editado por John Campbell, 939-1011. Oxford: Butterworth-Heinemann. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856178099100167>.
- Campos, Livia Flávia de Albuquerque. 2010. "Design de metais sanitários: estudo diacrônico de torneiras para banheiros residenciais", LEI-PPGDesing-UNESP-BAURU.
- Castings, MRT. 2015. "The Choice of Process - Sand Casting, Gravity and High Pressure Casting". Acedido a 13/04/2015. <http://www.mrt-castings.co.uk/pressure-diecasting-methods.html>.
- Castro, Gabriel Sousa. 2008. "Estudo e otimização da liga de latão utilizada na GROHE PORTUGAL, S.A", FEUP.

- Dias, Maria de Fátima Martins de Sousa. 2008. "Diagnóstico e Melhoria do Fabrico de Machos pelo Processo de Caixa Quente".
- Diehl, Stiftung & Co. 2015. "ECOMERICA Alloys". Acedido a 19/03/2015. <http://www.diehl.com/en/diehl-metall/company/brands/diehl-metall-messing/ecomerica/alloys.html>.
- Duarte, Ruben. 2014. "Desenvolvimento do processo de fundição por baixa pressão para a obtenção de puxadores em ligas de alumínio", FEUP.
- Edupack, CES. 2015. Granta Design Limited.
- Elliott, Sara. 2015. "How to Choose a Bathroom Faucet". Acedido a 16/03/2015. <http://home.howstuffworks.com/home-decor/bathroom/how-to-choose-a-bathroom-faucet1.htm>.
- Ferreira, José M. G. de Carvalho. 1999. *Tecnologia da Fundição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Fu, Penghuai, Alan A. Luo, Haiyan Jiang, Liming Peng, Yandong Yu, Chunquan Zhai e Anil K. Sachdev. 2008. "Low-pressure die casting of magnesium alloy AM50: Response to process parameters". *Journal of Materials Processing Technology* no. 205 (1–3):224-234. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607011399>.
- García, P., S. Rivera, M. Palacios e J. Belzunce. 2010. "Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses". *Engineering Failure Analysis* no. 17 (4):771-776. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630709002064>.
- HSE, Health and Safety Executive -. 2013. "Beryllium and you. Working with beryllium ".
- INDUGA. 2015. Low Pressure Die Casting Machine - Type LPDC 1011. Germany: INDUGA.
- Institute, European Copper. 2007. *Recommendation on the non-use of bismuth for lead substitution*. European Copper Institute.
- Institute of British Foundrymen. 1961. *Atlas of defects in castings*. Vol. 2nd rev. ed. London: Institute of British Foundrymen.
- International, ASM. 1998. *ASM Handbook - Volume 15 - Casting*. ASM International.
- . 2009. *Casting design and performance*. Ohio: ASM International.
- Krishna, Prasad. 2001. "A Study of Interfacial Heat Transfer and Process Parameter in Squeeze Casting and Low Pressure Permanent Mold Casting", University of Michigan.
- Kuo, Jer-Haur, Feng-Lin Hsu e Weng-Sing Hwang. 2001. "Development of an interactive simulation system for the determination of the pressure–time relationship during the filling in a low pressure casting process". *Science and Technology of Advanced Materials* no. 2 (1):131-145. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1468699601000390>.
- Kurtz, Lothar Hartmann. 2007. "Low Pressure Casting - a process which pays off". *11th International Trade Fair for Foundry Dusseldorf*.

- La Fontaine, A. e V. J. Keast. 2006. "Compositional distributions in classical and lead-free brasses". *Materials Characterization* no. 57 (4–5):424-429. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580306000696>.
- Lucefin, Gruppo. 2015. C45E Technical Card. Lucefin S. p. A.
- Luo, Alan A. 2013. "Magnesium casting technology for structural applications". *Journal of Magnesium and Alloys* no. 1 (1):2-22. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956713000030>.
- M. Sadayappan, J. P. Thomson, M. Elboudjaini, G. Ping Gu, M. Shao. 2004. "Grain Refinement of Permanent Mold Cast Copper Base Alloys", Materials Technology Laboratory.
- Magma. 2015. "MAGMA - Realidade Otimizada". [http://www.magma-soft.com.br/pt\\_BR/solutions/MAGMA\\_5.html](http://www.magma-soft.com.br/pt_BR/solutions/MAGMA_5.html).
- Marques, Flávio Dias Ferreira. 2010. "Desenvolvimento do Processo de Vazamento em Coquilhas Rotativas", INEGI, FEUP.
- Martinez-Hernandez, M., A. Juarez-Hernandez, C. González-Rivera e M. A. L. Hernandez-Rodriguez. 2013. "Bismuth segregation and crack formation on a free lead yellow brass tap". *Engineering Failure Analysis* no. 28 (0):63-68. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630712002105>.
- Melo, Pedro. 2014. "Simulação do enchimento e solidificação de peças em ligas de cobre por fundição de baixa pressão", FEUP.
- Mesquita, Adolfo Pinto Dá. 1978. *Tecnologia da Fundição de Ligas de Cobre*. Instituto Nacional de Investigação Industrial.
- Messing, Diehl Metall. 2005. Diehl 430 PbF. Diehl Metall Messing.
- Metals, NBM. 2015. "C36000 Free Machining Brass / Free Cutting Brass". Acedido a 23/06/2015. <http://www.nbmmetals.com/products/c36000-free-machining-brass-free-cutting-brass>.
- Mi Guofa, Liu Xiangyu, Wang Kuangfei and Fu Hengzhi. 2008. "Numerical Simulation of Low Pressure Die-Casting Aluminium Wheel". *China: China Foundry*.
- Moreira, Luís Filipe Minhava Peixoto Morais. 2014. "Desenvolvimento da metodologia de fabrico de protótipos de torneiras pelo processo de cera perdida", FEUP.
- Neto, Rui. 2014. "Apontamentos da disciplina de Tecnologia da Moldação", FEUP.
- NFFS, Non-Ferrous Founder's Society. 1994. *Copper Casting Alloys*. Copper Development Association Inc.
- Nobel, Christoph, Fritz Klocke, Dieter Lung e Sebastian Wolf. 2014. "Machinability Enhancement of Lead-free Brass Alloys". *Procedia CIRP* no. 14 (0):95-100. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001619>.
- NOVACAST. 2015. "NovaFlow&Solid". <http://www.novacast.se/product/novaflowsolid-cv>.
- Oliveira, Helder Joaquim Gonçalves de. 2004. "Estudo de Ligas de Cu Alternativas aos Latões Utilizados no Fabrico de Torneiras", DEMEGI, FEUP.

- Patternmaking, Central. 2015. "Foundry Tooling". Acedido a 16/04/2015. <http://www.centralpatternmaking.co.uk/services/foundry-tooling/>.
- PlumbingHelpToday. 2011. "The History of Faucet". Acedido a 10/03/2015. <http://plumbinghelptoday.com/denver-plumbing-repair-blog/2011/05/the-history-of-the-faucet/>.
- Ravi, B. 2005. *Metal Casting: Computer-Aided Design and Analysis*. PHI Learning.
- Reikher, A. e M. Barkhudarov. 2007. *Casting: An Analytical Approach*. Springer London.
- Santos, Abel Dias. 2014. "Apontamentos de Simulação de Processos Tecnológicos", FEUP.
- Schmelzmetall. 2006. "Material Data Sheet (Hovadur CB2 e CNB)".
- Schmid, Serope Kalpajian and Steven. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology*. 6th ed.
- Schneider, George. 2009. *Machinability of Metals*. American Machinist.
- SeBiLOY, EnviroBrass. Sem data. Alloy Data Sheet. Cooper Development Association Inc.
- Shindoh, Mitsubishi. 2015. "ECO BRASS lead-free, environmentally friendly". Acedido a 24/03/2015. [http://www.ecobrass.com/html\\_e/index-e.html](http://www.ecobrass.com/html_e/index-e.html).
- Society, American Foundrymen's. 1984. *Casting Copper-Base Alloys*. American Foundrymen's Society.
- Society, American Foundrymen's. 1994. *Analysis of Casting Defects*. 4th ed. Des Plaines, ILL: American Foundrymen's Society.
- Torres, Francisco Faria Ricca de Ancede. 2014. "Otimização do processo de obtenção de peças em aluminetos de titânio por fundição de precisão", FEUP, UP.
- Vilarinho, Cândida, JP Davim, D Soares, F Castro e J Barbosa. 2005. "Influence of the chemical composition on the machinability of brasses". *Journal of Materials Processing Technology* no. 170 (1):441-447.
- Wagner, John D. 2015. "Fixing a Leaky Faucet". Acedido a 13/03/2015. <http://www.thisoldhouse.com/toh/article/0,,193895,00.html>.
- Wang, Ying-chun, Da-yong Li, Ying-hong Peng e Xiao-qin Zeng. 2007. "Numerical simulation of low pressure die casting of magnesium wheel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* no. 32 (3-4):257-264. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-0325-1>.
- Zhang, B., D. M. Maijer e S. L. Cockcroft. 2007. "Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels". *Materials Science and Engineering: A* no. 464 (1-2):295-305. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509307003334>.



## **7 ANEXOS**

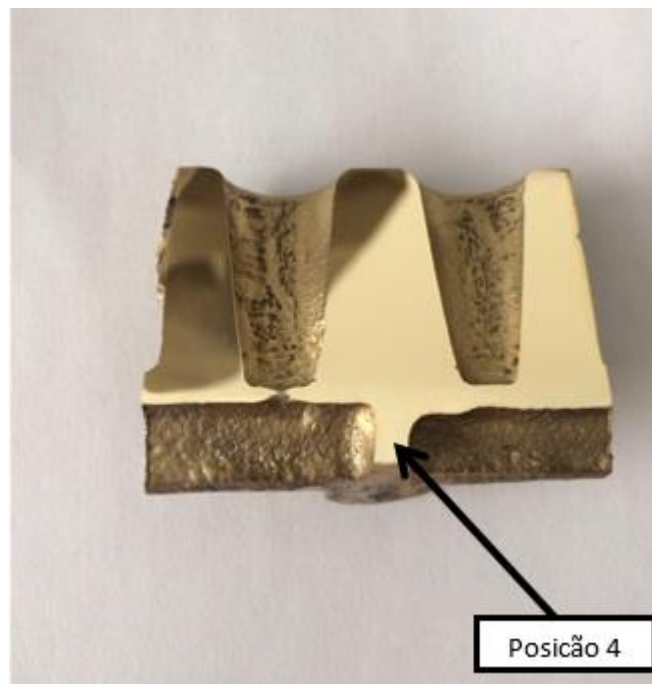
---



## **ANEXO A – Análise dos defeitos nas amostras C31 e C12**

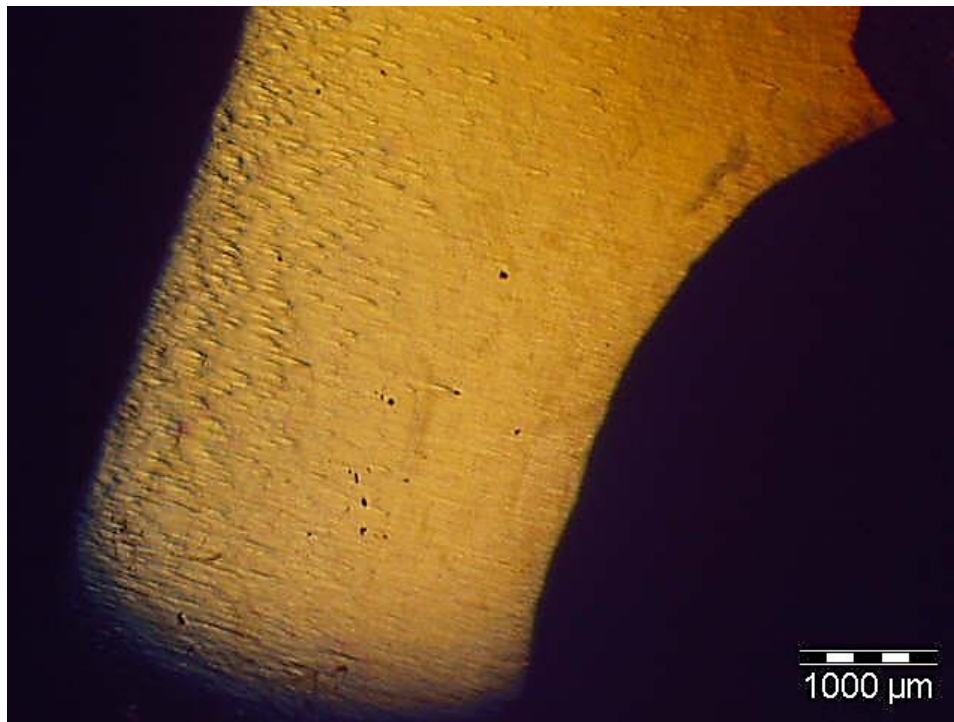
### **Amostra C31**

A superfície da amostra C31 é a outra superfície do corte 3 que complementa a superfície da amostra C32. Nesta peça analisou-se a superfície na posição onde haveria a probabilidade de existir microrechupe e onde a sua existência seria mais crítica. A posição onde a amostra foi analisada pode ser vista na Figura 116.

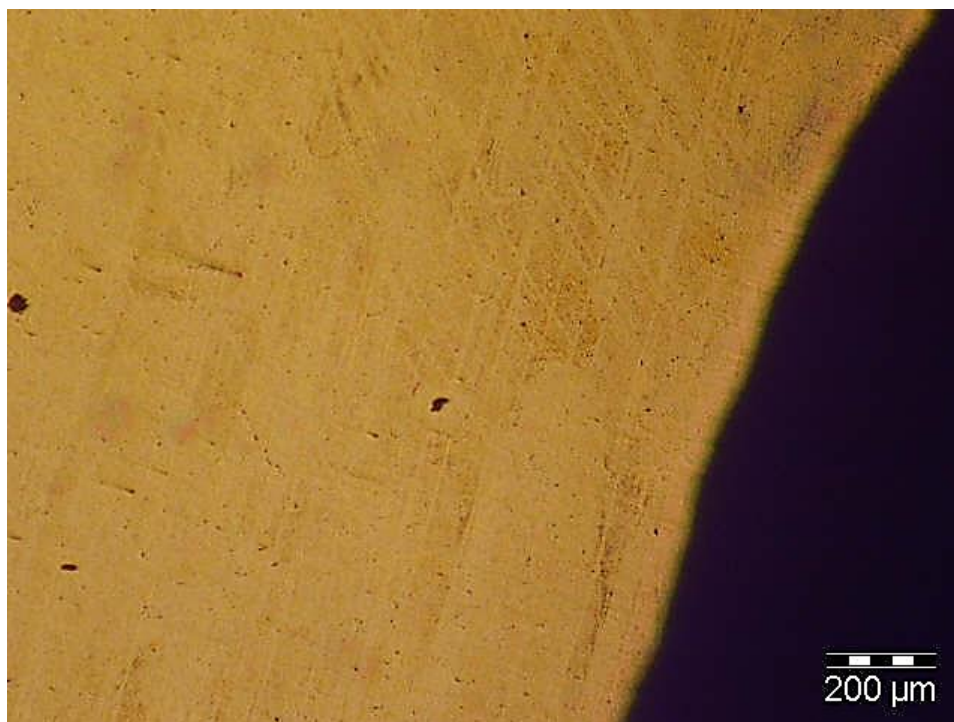


*Figura 116 – Posições analisadas na amostra C31*

As imagens das microestruturas obtidas na posição 4 estão apresentadas nas Figuras 117 e 118.



*Figura 117 – Amostra C31 – Posição 4 – 1000 μm*

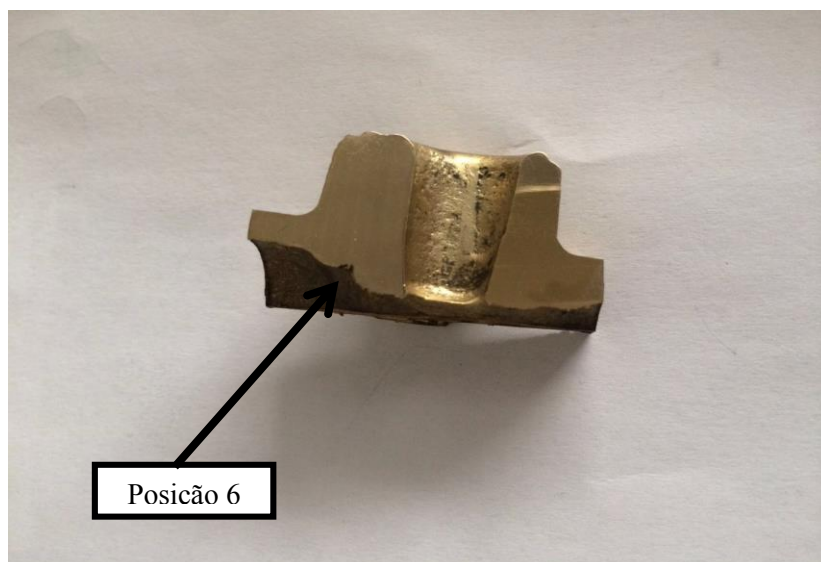


*Figura 118 – Amostra C31 – Posição 4 – 200 μm*

Da análise das Figuras 117 e 118 pode-se verificar que microestruturalmente, a amostra C31, não contém fuga pois não existem defeitos na peça como microrechupes ou porosidades. Existem pequenas inclusões mas não afetam o funcionamento da peça.

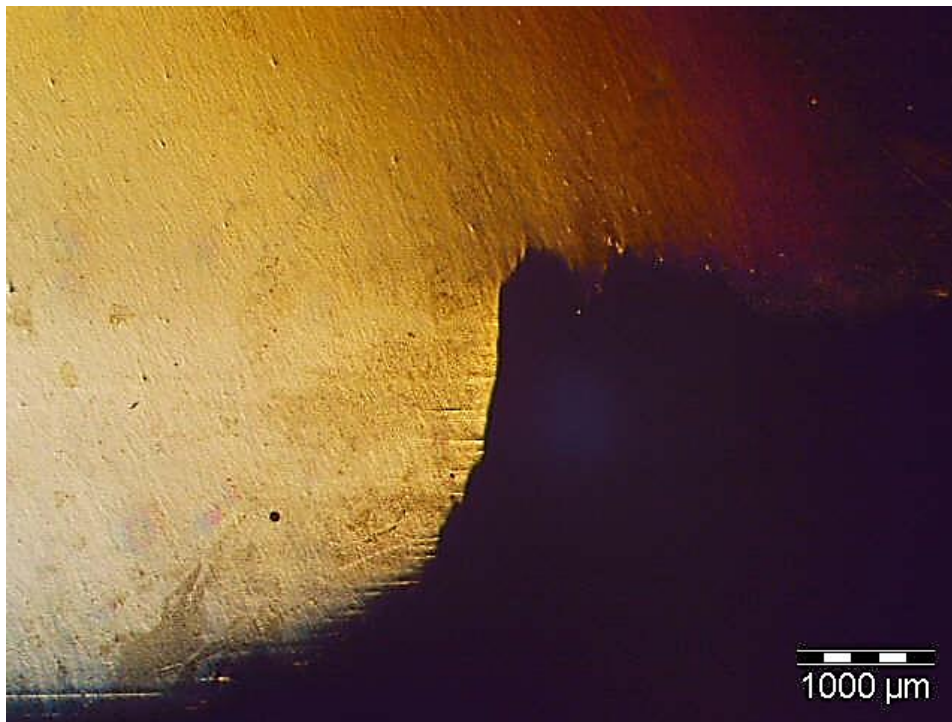
### **Amostra C12**

A superfície de amostra C12 é uma das superfícies do corte 1 e para perceber qual a dimensão dos defeitos neste corte analisou-se a sua superfície. A posição onde a amostra C12 foi analisada está apresentada na Figura 119.

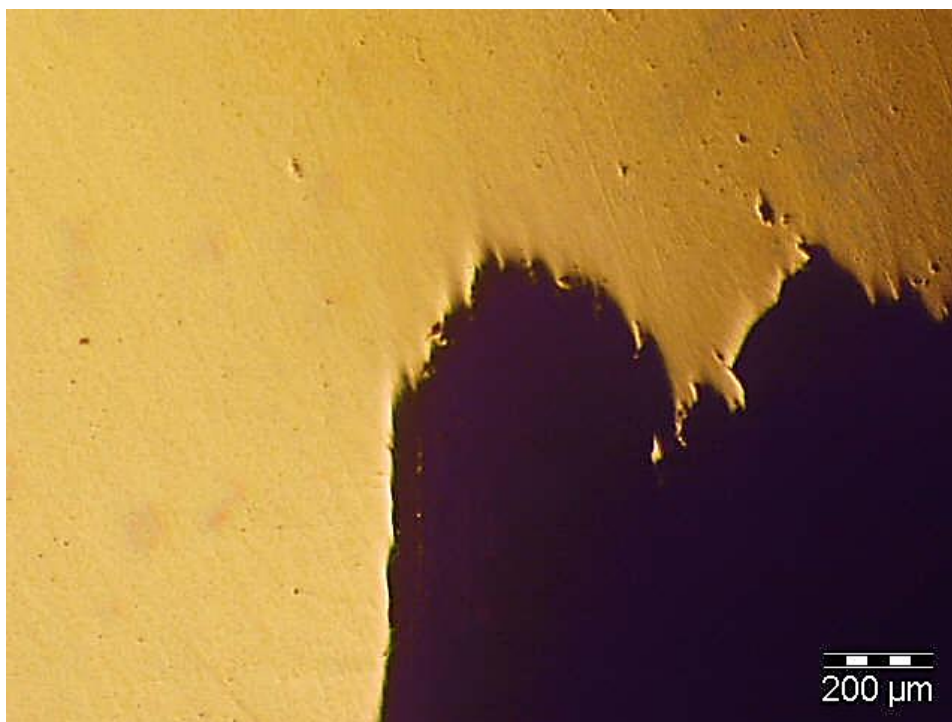


*Figura 119 – Posições analisadas na amostra C12*

As imagens das microestruturas obtidas na posição 6 estão apresentadas nas Figuras 120 e 121.



*Figura 120 - Amostra C12 – Posição 6 – 1000 μm*



*Figura 121 - Amostra C12 – Posição 6 – 200 μm*

Analisando as Figuras 120 e 121 pode-se ver que a amostra C12, microestruturalmente, não contém defeitos como microrechupes e porosidades, logo não tem fuga. Tal como as outras peças contem algumas inclusões mas em nada afeta o correto funcionamento da peça.

## ANEXO B – Propriedades dos materiais usados na simulação

Todas as propriedades abaixo mostradas foram retiradas do programa de simulação ProCAST.

### Material usado na peça

Para realizar as simulações foi necessário escolher uma liga a usar. A liga escolhida foi a liga usada na CIFIAL. A composição química da liga usada está apresentada na Figura 122.

Name	Cu_Zn_Bi_Inegi	
Owner Name	snannan	
Last Modified By		
Last Modified	2014-07-01	
Description		

Composition	Thermal	Fluid	Stress	+
-------------	---------	-------	--------	---

Property	Value	
<b>Thermodynamic Computations</b>		
Solid Diffusion Model	Scheil	▼
	Compute Properties	
<input type="checkbox"/> <b>CAFE Computations</b>		
Element	%Composition	Recommended Range(%)
<b>Base</b>	Cu	▼
Al	0.6	0 ~ 3
B		0 ~ 0.5
Bi	0.7	0 ~ 15
C		0 ~ 0.5
Cr		0 ~ 10
Fe	0.15	0 ~ 10
Mn	0.03	0 ~ 10
Ni	0.1	0 ~ 35
P		0 ~ 2
Pb	0.1	0 ~ 5
Se		0 ~ 15
Si	0.05	0 ~ 5
Sn	0.2	0 ~ 14
Ti		0 ~ 0.5
Zn	37	0 ~ 45

Figura 122 – Composição química da liga usada nas simulações

Na Figura 123 está apresentada a condutividade térmica da liga em função da temperatura.

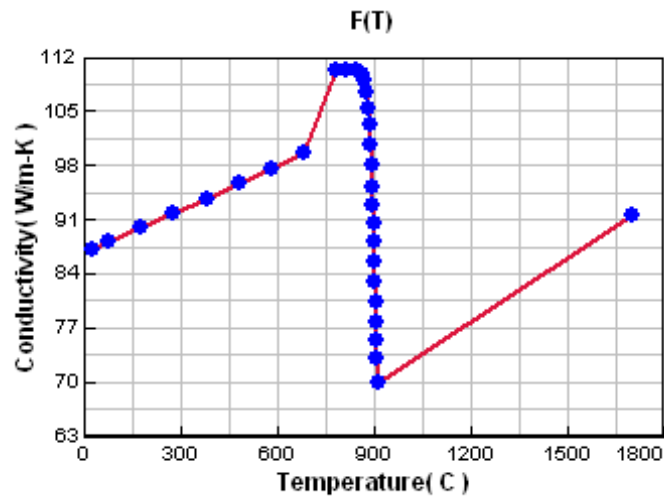


Figura 123 – Condutividade Térmica da liga (W/m-K) vs. Temperatura (°C)

Na Figura 124 está apresentada a densidade da liga em função da temperatura.

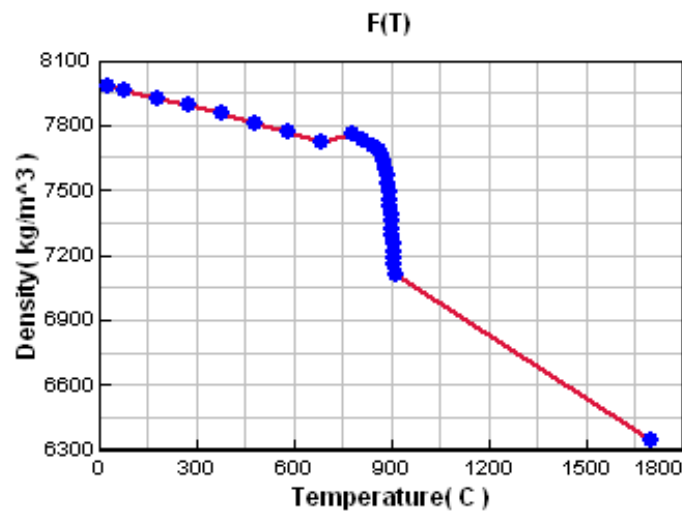


Figura 124 – Densidade da liga (Kg/m³) vs. Temperatura (°C)

Na Figura 125 está apresentada a fração sólida da liga em função da temperatura.



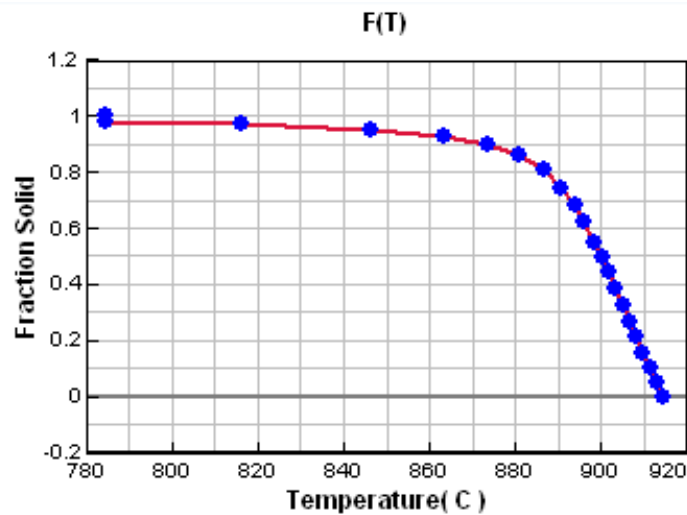


Figura 125 – Fração Sólida vs. Temperatura (°C)

Na Figura 126 estão apresentadas as temperaturas de *liquidus* e *solidus* da liga usada nas simulações.

Liquidus-Solidus				
Liquidus	Const.	914	C	
Solidus	Const.	784	C	

Figura 126 – Temperatura (°C) de liquidus e solidus da liga usada nas simulações

### Areia de Sílica (Material usado nos machos)

Na Figura 127 está apresentada a condutividade térmica da areia de sílica em função da temperatura.

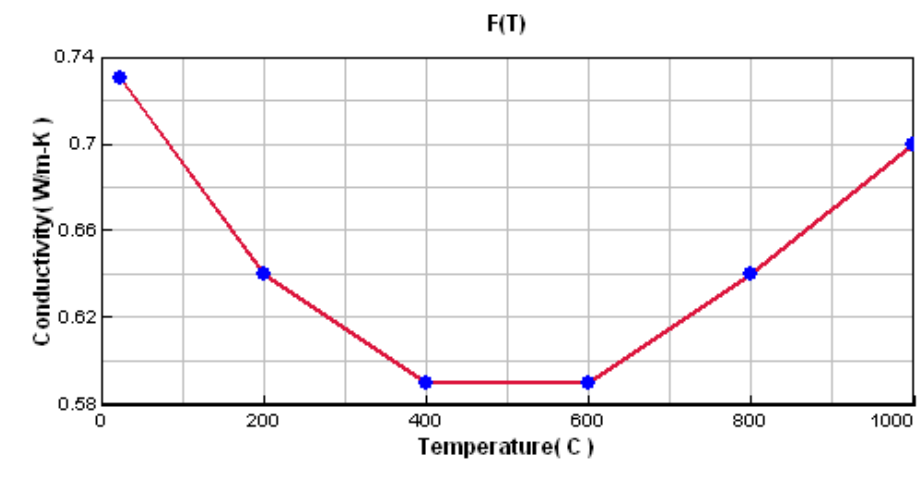


Figura 127 - Condutividade Térmica da areia de sílica (W/m.K) vs. Temperatura (°C)

Na Figura 128 está apresentada o calor específico da areia de sílica em função da temperatura.

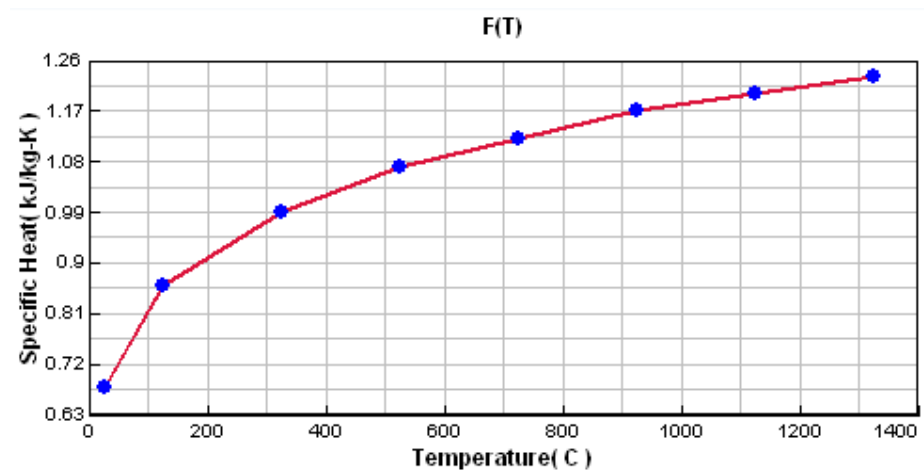


Figura 128 – Calor específico da areia de sílica (KJ/Kg.K) vs. Temperatura (°C)

**Aço C45E (Ck45) (Material usado na coquilha)**

Na Figura 129 está apresentada a composição química do aço C45E (Ck45)

Composition			Thermal	Fluid	+
Property		Value			
Thermodynamic Computations					
Solid Diffusion Model		Scheil			
		Compute Properties			
<input type="checkbox"/> CAFE Computations					
Element		%Composition		Recommended Range(%)	
Base		Fe			
Al				0 ~ 0.5	
B				0 ~ 4	
C		0.45		0 ~ 4	
Co				0 ~ 10	
Cr		0.35		0 ~ 27	
Cu				0 ~ 7.5	
Mg				0 ~ 0.5	
Mn		0.65		0 ~ 4.5	
Mo		0.05		0 ~ 10	
N				0 ~ 0.5	
Nb				0 ~ 4	
Ni		0.35		0 ~ 36	
P				0 ~ 0.05	
S				0 ~ 0.05	
Si		0.3		0 ~ 5.5	
Sn				0 ~ 0.05	
Ti				0 ~ 4	
V				0 ~ 7	
W				0 ~ 7	
Zr				0 ~ 0.05	

Figura 129 – Composição química do aço C45E (Ck45)

Na Figura 130 está apresentada a condutividade térmica do material em função da temperatura.

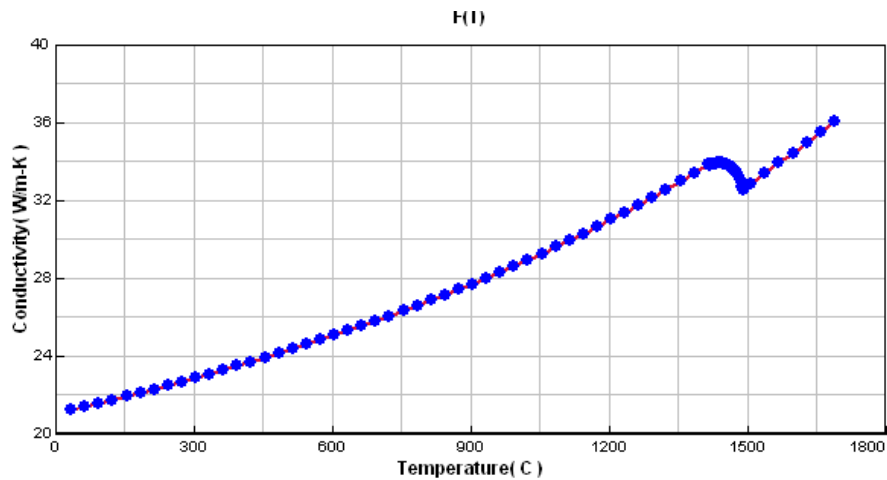
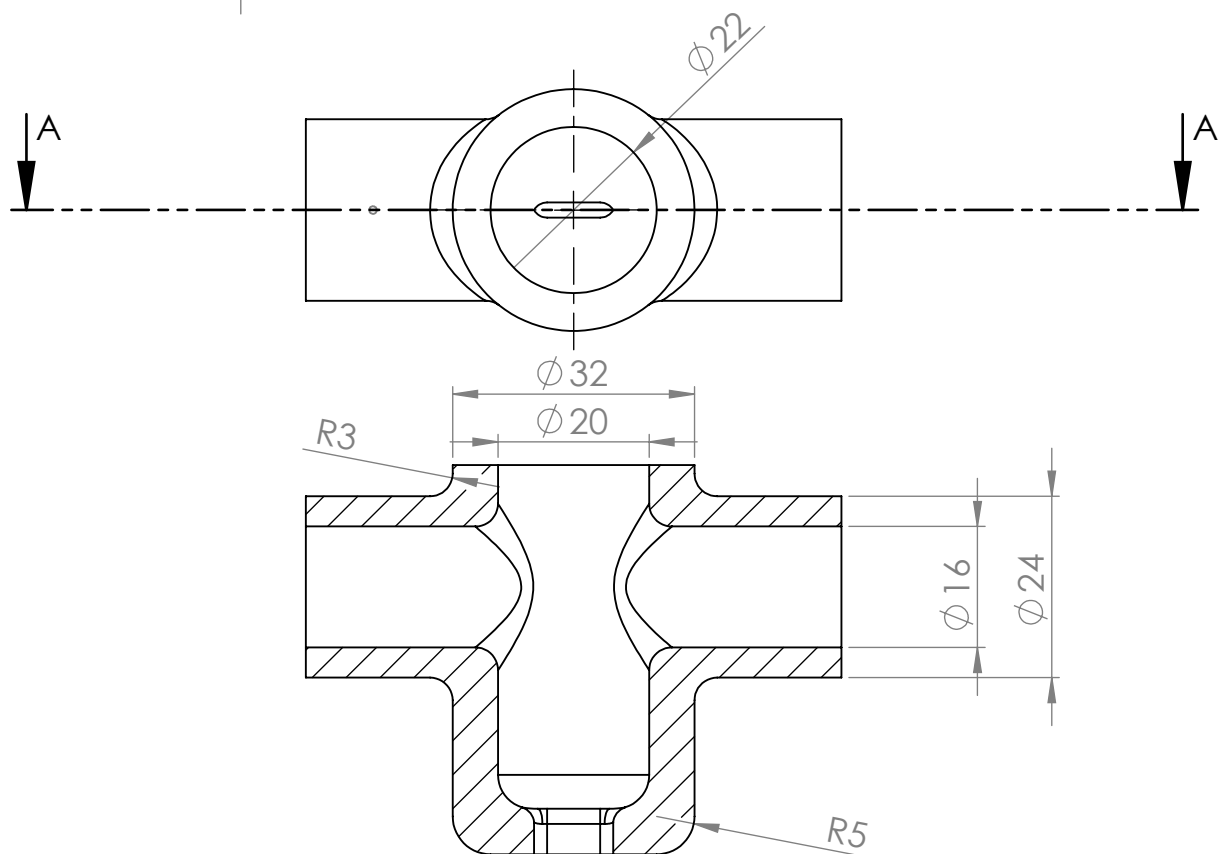
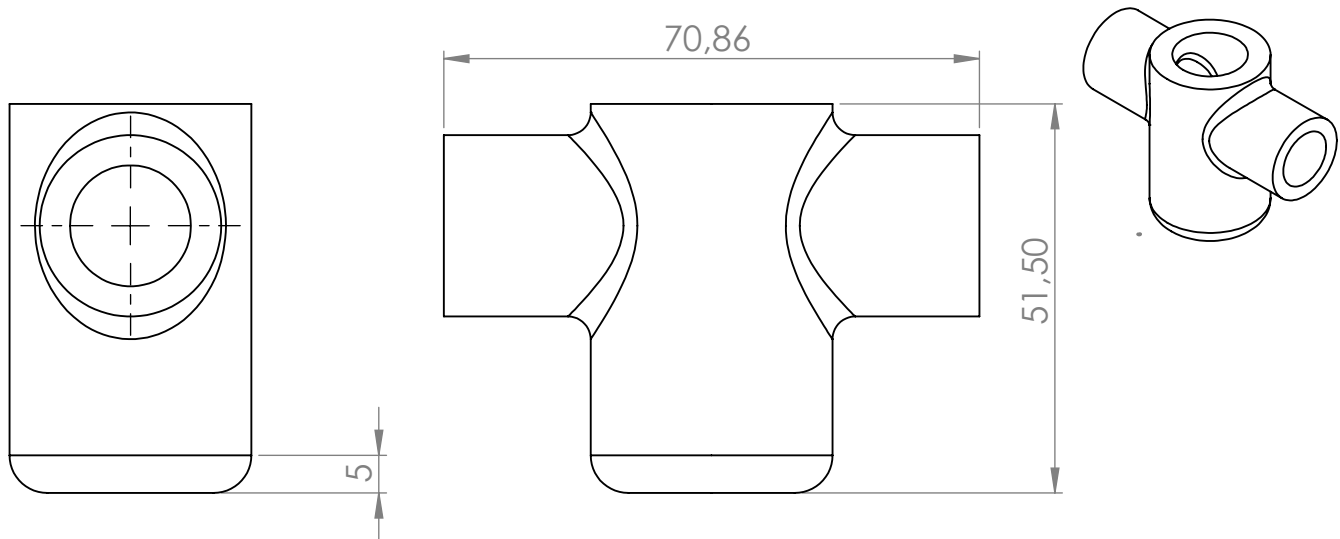


Figura 130 - Condutividade Térmica do aço C45E (Ck45) (W/m-K) vs. Temperatura (°C)



## **ANEXO C – Desenho de Definição – Macho Exterior em Areia**





SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
WEIGHT:					

TITLE:		DWG NO.		A4	
		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	

**SolidWorks Student Edition.  
For Academic Use Only.**

MATERIAL:

DWG NO.

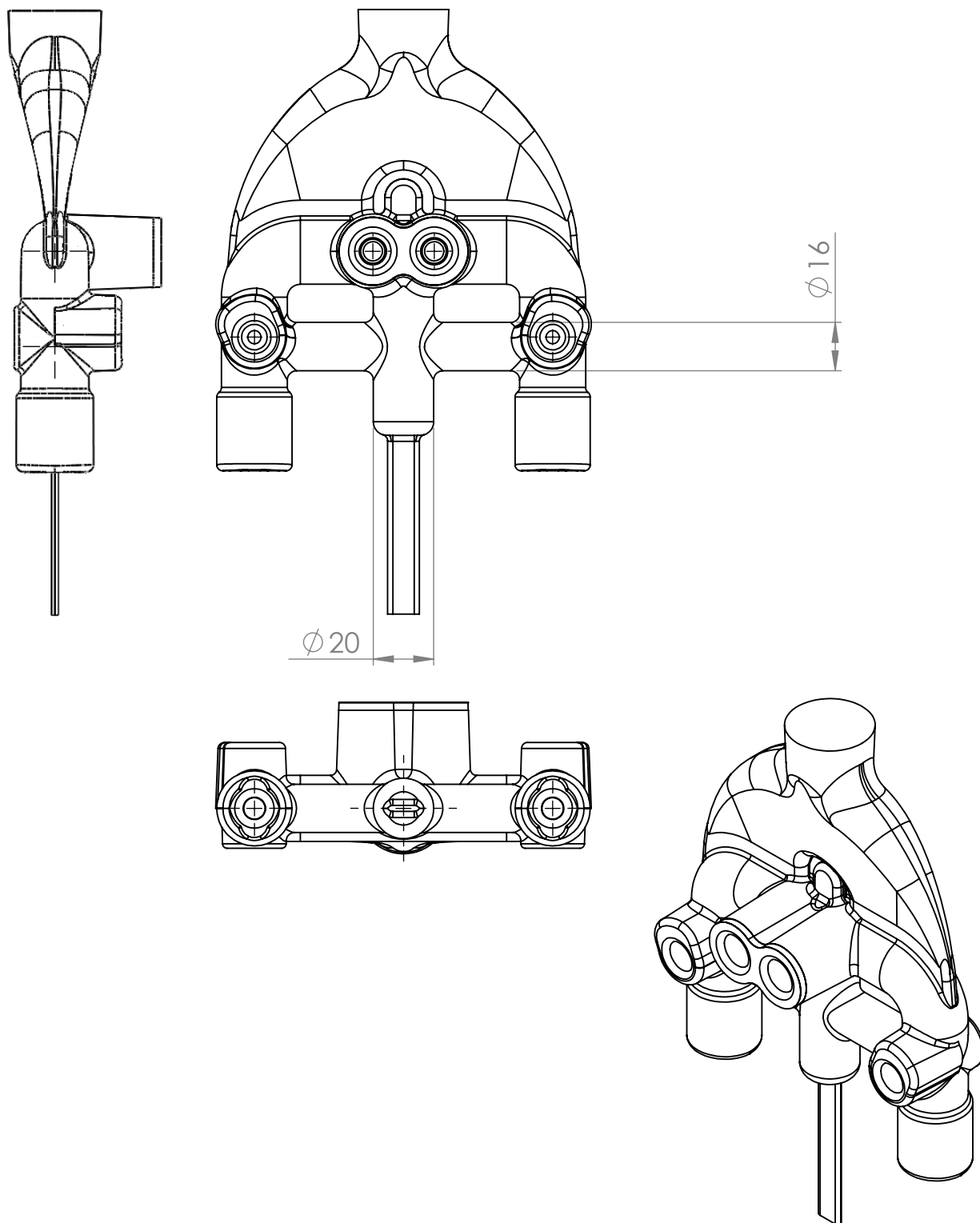
Macho em Areia para o  
Alimentador





## **ANEXO D – Desenho de Definição – Alimentador**





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
WEIGHT:					

TITLE:		DWG NO.		SHEET 1 OF 1	
Alimentador e Peça		A4			

**SolidWorks Student Edition.  
For Academic Use Only.**

MATERIAL:



## **ANEXO E – Desenho de Definição – Macho Interior em Areia**





